

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

№ 4 (334) ИЮЛЬ-АВГУСТ, 2020

ISSN 0044-3948

космонавтика
астрономия
геофизика

Нам 55 лет!

В ЛУЧАХ ЗВЕЗДЫ ПО ИМЕНИ СОЛНЦЕ. ИСЗФ СО РАН – 60 ЛЕТ

ПЕРЕМЕННАЯ ЗВЕЗДА СОЛНЦЕ И ЕГО МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ВЗГЛЯД НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ ЧЕРЕЗ GPS И ГЛОНАСС

УНИВЕРСИТЕТСКАЯ АСТРОНОМИЯ:
ИССЛЕДОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ В ГАИШ МГУ

НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ПО СЛЕДАМ ОЧЕНЬ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ ЖУРНАЛЫ ТЕПЕРЬ ДОСТУПНЫ ВСЕМ



Уважаемые коллеги!

Открыта подписка для физических лиц
на номера 2020 г. научно-популярных журналов
«Земля и Вселенная», «Природа»,
«Энергия: экономика, техника, экология»

Журнал «Земля и Вселенная»

Стоимость годового комплекта (6 номеров) 1200 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 42-31)

E-mail: zevs@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Журнал «Природа»

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3000 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 41-71)

E-mail: priroda@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Журнал «Энергия: экономика, техника, экология»

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3000 руб.

Редакция журнала

Тел.: +7 (495) 362-07-82

E-mail: energy@iht.mpei.ac.ru

ул. Красноказарменная, 17а

Журналы также можно приобрести в розницу в сети
магазинов «Академкнига» по следующим ценам:

«Земля и Вселенная» – 220 руб.

«Природа» – 270 руб.

«Энергия: экономика, техника, экология» – 270 руб.

реклама

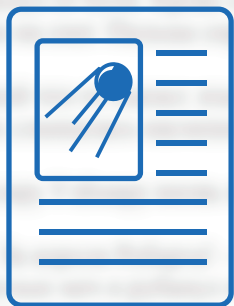


Издательство “Наука” оказывает услуги:

- СОЗДАНИЕ ОРИГИНАЛ-МАКЕТА
 - редактирование
 - вёрстка
 - изготовление рисунков
- ХУДОЖЕСТВЕННОЕ ОФОРМЛЕНИЕ
- ВЕСЬ КОМПЛЕКС ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ УСЛУГ
- РАСПРОСТРАНЕНИЕ В РОЗНИЧНОЙ СЕТИ “АКАДЕМКНИГА”

**Высокопрофессиональные специалисты “Науки”
готовы к сотрудничеству**

naukapublishers.ru



НАУКА

www.libnauka.ru

*Добро пожаловать
в электронную библиотечную систему
Издательства «Наука»!*

Электронная библиотечная система Издательства «Наука» – это простой и удобный доступ к огромной коллекции статей и книг, входящих в портфолио «Науки»

Электронная библиотечная система это:

- научная, научно-популярная и классическая литература, от статей до монографий
- оперативное обновление новинок благодаря тесной интеграции с редакционно-издательской системой «Науки»
- разветвленный тематический каталог
- простая и эффективная система поиска
- интуитивная и простая система оформления заказа и подписок
- прозрачная система статистики
- надежность доступа и стабильность работы

Реклама

Присоединяйтесь к миру «Науки»!

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

№4 (334)
ИЮЛЬ-АВГУСТ, 2020

ISSN 0044-3948

космонавтика
астрономия
геофизика

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
«Наука»
Москва

На стр. 1 обложки:
Солнце над Землей,
фотография сделана
с Международной космической
станции 24 мая 2020.
Фотография: NASA

В НОМЕРЕ:

Колонка главного редактора 3

ЧЕРЕПАЩУК А.М. Университетская астрономия:
наблюдения рентгеновских двойных систем на
Кавказской горной обсерватории и Крымской
станции ГАИШ МГУ 5

НОВИКОВ И.Д. Новый этап развития общей теории
относительности 22

АРЕФЬЕВ В.А. По следам очень большого взрыва 27

In Memoriam

Михаил Николаевич Павлинский 31
(08.12.1959–01.07.2020)

Институты. Обсерватории

МЕДВЕДЕВ А.В., ЯЗЕВ С.А. В лучах звезды 32
по имени Солнце. Институту солнечно-земной
физики СО РАН – 60 лет

ГРИГОРЬЕВ В.М., ГОЛОВКО А.А. Переменная звезда 45
Солнце и его магнитное поле

ЯСЮКЕВИЧ Ю.В., ЯСЮКЕВИЧ А.С. Взгляд на 59
ионосферу Земли через GPS и ГЛОНАСС

Люди науки

БОРОВИН Г.К., ГОЛУБЕВ Ю.Ф., ЕФИМОВ Г.Б., 72
КОЗЛОВ Н.Н., ТУЧИН А.Г. Тимур Магометович
Энеев (к 95-летию со дня рождения)

РОМЕЙКО В.А. Человек Вселенной 88
(памяти Бориса Григорьевича Пшеничника)

История науки

ГЕРАСЮТИН С.А. Аварийный полет корабля 94
«Союз-1» (расшифровка переговоров В.М. Комарова
с Центром управления полетом)

Table of Content and Selected Abstracts 109

Earth&Universe: Astronomy, Geophysics, Cosmonautics
Bimonthly popular scientific magazine of the Russian Academy of Sciences & NAUKA Publishing.
Founded 1965.
Published by NAUKA Publishing, Profsoyuznaya Str., 90, 117997, Moscow, Russia.

Редакционная коллегия:

главный редактор
академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ,
летчик-космонавт
П.В. ВИНОГРАДОВ,
зам. главного редактора
кандидат филолог. наук
О.В. ЗАКУТНЯЯ,
доктор исторических наук
К.В. ИВАНОВ,
летчик-космонавт
А.Ю. КАЛЕРИ,
зам. главного редактора
академик В.М. КОТЛЯКОВ,
кандидат физ.-мат. наук
О.Ю. ЛАВРОВА,
доктор физ.-мат. наук
А.А. ЛУТОВИНОВ,
зам. главного редактора
доктор физ.-мат. наук
О.Ю. МАЛКОВ,
доктор физ.-мат. наук
И.Г. МИТРОФАНОВ,
академик И.И. МОХОВ,
член-корр. РАН
И.Д. НОВИКОВ,
доктор физ.-мат. наук
С.П. ПЕРОВ,
доктор физ.-мат. наук
К.А. ПОСТНОВ,
доктор физ.-мат. наук
М.В. РОДКИН,
научный директор
Московского планетария
Ф.Б. РУБЛЁВА,
член-корр. РАН
А.Л. СОБИСЕВИЧ,
член-корр. РАН
В.А. СОЛОВЬЁВ,
академик
А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
доктор физ.-мат. наук
В.В. ШЕВЧЕНКО,
член-корр. РАН
Б.М. ШУСТОВ

Editorial Board:

Editor-in-chief
Acad. Dr. Lev M. ZELENYI
Acad. Dr. Anatoly M. CHEREPASCHUK
Dr. Konstantin V. IVANOV
Pilot-cosmonaut Alexander Yu. KALERI
Deputy Editor-in-chief
Acad. Dr. Vladimir M. KOTLYAKOV
Dr. Olga Yu. LAVROVA
Dr. Alexander A. LUTOVINOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Oleg Yu. MALKOV
Dr. Igor G. MITROFANOV
Acad. Dr. Igor I. MOKHOV
RAS Corr.Member Dr. Igor D. NOVIKOV
Dr. Stanislav P. PEROV
Dr. Konstantin A. POSTNOV
Dr. Mikhail V. RODKIN
Faina B. RUBLEVA
Dr. Vladislav V. SHEVCHENKO
RAS Corr. Member Dr. Boris M. SHUSTOV
RAS Corr. Member Dr. Alexey L. SOBISEVICH
RAS Corr. Member Dr. Vladimir A. SOLOVYEV
Pilot-cosmonaut Pavel V. VINOGRADOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Olga V. ZAKUTNYAYA

Колонка главного редактора

Уважаемые читатели, коллеги, друзья!

Високосный 2020 год, как и полагается високосному году, принес всем нам множество проблем и даже трагедий. Наша космическая промышленность во время пика коронавирусной инфекции потеряла одного из своих лидеров – генерального конструктора пилотируемых космических комплексов академика Евгения Анатольевича Микрина (1955–2020). Мы скорбим вместе с родственниками и друзьями Евгения Анатольевича.

Сейчас жизнь постепенно возвращается к своему нормальному течению, хотя все понимают, что многое в нашем мироощущении, привычках и поведении изменилось навсегда. Коронавирус стал, по крайней мере, одной из причин переноса запуска к Марсу космического аппарата российско-европейской программы «ЭкзоМарс». Аппарат должен был доставить к Марсу российскую научную посадочную платформу с европейским марсоходом. Старт этой экспедиции теперь перенесен на 2022 год и, надеюсь, будет успешным. Определенный оптимизм вселяет то, что орбитальный аппарат TGO (Trace Gas Orbiter) – первый аппарат программы «ЭкзоМарс», запущенный в 2016 году, продолжает успешно работать у Марса. В одном из следующих

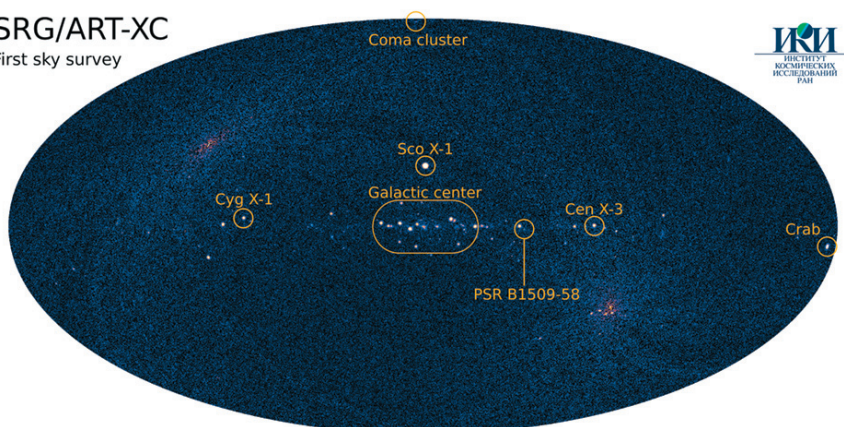
номеров мы расскажем об интереснейших результатах, полученных на TGO.

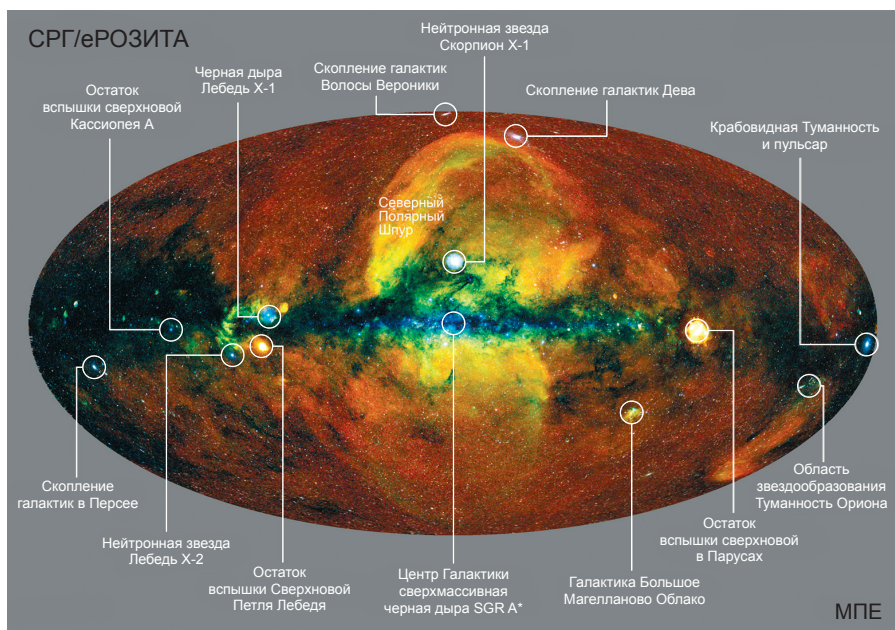
Июль в этом году был оптимальным месяцем для старта экспедиций к Марсу, и мы (российские и европейские ученые) не без грусти наблюдали старты целой «флотилии» межпланетных кораблей. Первым стал орбитальный аппарат Объединенных Арабских Эмиратов под названием «Аль-Амаль» («Надежда»), поднятый японской ракетой-носителем с космодрома на острове Танегасима утром в понедельник, 20 июля. Следующей последовала масштабная китайская экспедиция «Тяньвэнь-1» («Вопросы к небесам»), стартовавшая 23 июля. Эта миссия впервые включает в себя полный набор космических аппаратов: и орбитальный аппарат, и посадочный, и марсоход. И, наконец, 30 июля состоялся запуск очередного марсохода NASA под названием *Perseverance* («Настойчивость»). Мы, конечно, желаем нашим коллегам всяческих успехов – Марс трудная планета, не очень охотно раскрывающая свои тайны.

Хорошие новости получили российские астрофизики в самом начале лета: телескопы ART-XC и eROSITA на борту российской рентгеновской обсерватории «Спектр-РГ», год назад стартовавшей с космодрома Байконур, завершили

Карта первого обзора СРГ/ART-XC в диапазоне 4–12 кэВ, в галактических координатах. Подписаны несколько наиболее ярких и интересных объектов и область Галактического центра (с) ИКИ РАН

SRG/ART-XC
First sky survey





Первый обзор неба СРГ/eROSITA с указанием наиболее ярких и примечательных объектов и протяженных структур. Темная полоса на экваторе карты соответствует плоскости нашей Галактики Млечный Путь (с). М. Гильфанов, Р. Сюняев, Е. Чуразов (ИКИ), Н. Brunner, A. Merloni, J. Sanders (МПЕ)

первый (из запланированных восьми) обзоров всего неба. Эти карты мы публикуем здесь.

К сожалению, годовщина запуска была омрачена безвременной кончиной Михаила Николаевича Павлинского (1959–2020), создателя ART-XC – первого российского зеркального рентгеновского телескопа, чрезвычайно успешно работающего сейчас на борту КА «Спектра-РГ». Научный руководитель проекта «Спектр-РГ» академик Р.А. Сюняев выступил с предложением увековечить память о М.Н. Павлинском, назвав созданный им телескоп его именем – ART-XC им. М.Н. Павлинского. Это предложение получило безусловную поддержку у российского научного сообщества.

Число уже зарегистрированных телескопом ART-XC источников после первого обзора составило около 600: две трети из них находятся в нашей Галактике (компактные объекты с черными дырами, нейтронными звездами, белыми карликами, остатки вспышек сверхновых) и около трети – за ее пределами (в основном активные ядра галактик, а также не-

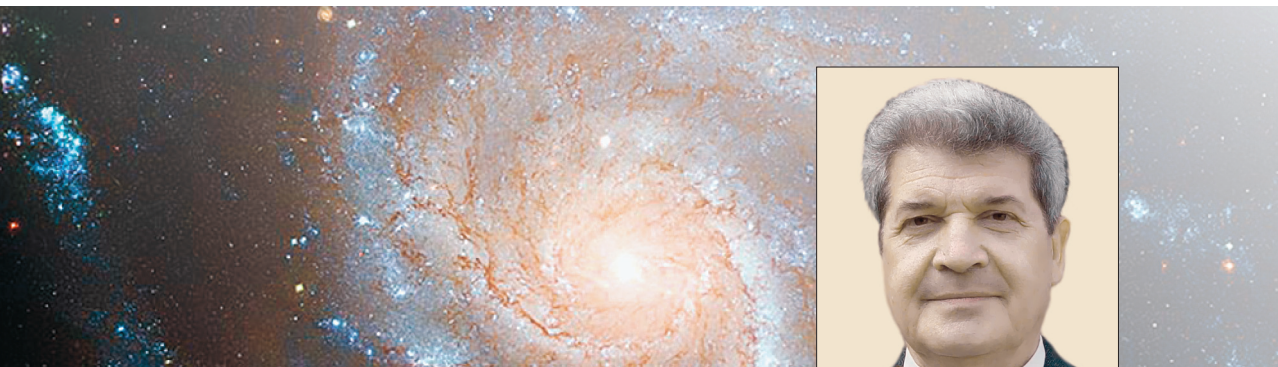
сколько массивных скоплений галактик). Чувствительность обзора будет расти пропорционально времени экспозиции.

Второй телескопа на борту «Спектра-РГ» – eROSITA, создан в Германии. Как было предварительно договорено задолго до запуска, российские ученые обрабатывают данные с одной стороны неба, а ученые Германии работают с рентгеновскими фотонами, пришедшими с другой половины неба. Уже первая карта всего неба, построенная двумя научными консорциумами, оказалась удивительно информативной. Всего за полгода сканирования неба eROSITA смогла удвоить полное число источников, зарегистрированных всеми спутниками в мире за 60 лет рентгеновской астрономии.

Это хорошие новости в наше непростое во всех отношениях время, и будем надеяться, что за ними придут и новые, с которыми мы постараемся знакомить вас.

*Главный редактор журнала
«Земля и Вселенная»
академик Лев Матвеевич Зелёный*

УНИВЕРСИТЕТСКАЯ АСТРОНОМИЯ: НАБЛЮДЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ НА КАВКАЗСКОЙ ГОРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ И КРЫМСКОЙ СТАНЦИИ ГАИШ МГУ



ЧЕРЕПАЩУК Анатолий Михайлович,

академик РАН

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова

DOI: 10.7868/50044394820040015

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ) – уникальный учебно-научный центр, где подготовка астрономических кадров ведется параллельно с научно-исследовательской деятельностью. За 188 лет существования ГАИШ обзавелся солидной базой для выполнения научных астрономических наблюдений и проведения студенческой практики. К концу 1980-х гг. ГАИШ располагал тремя астрономическими обсерваториями: в Крыму, Узбекистане и Казахстане. Однако в связи с распадом СССР, в 1993–1994 гг. ГАИШ потерял две высокогорные обсерватории, расположенные в Узбекистане (гора Майданак) и Казахстане (в горах Тянь-Шаня близ г. Алма-Аты). Крымскую станцию нам удалось сохранить для ГАИШ, а после исторического воссоединения Крыма с Россией эта наблюдательная база стала полноправной российской обсерваторией. Потеря двух высокогорных обсерваторий отбросила Институт на уровень 1960-х гг. – по степени оснащения астрономическими наблюдательными средствами. Поэтому руководство ГАИШ при поддержке ректора МГУ академика В.А. Садовниченко предприняло большие усилия по реализации строительства новой собственной высокогорной обсерватории на российской территории.

НОВАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ НА КАВКАЗЕ

В 2005 г. по инициативе ГАИШ МГУ обратился в Правительство РФ с просьбой о выделении целевых средств на закуп-

ку за рубежом современного высоко-технологичного телескопа с зеркалом диаметром 2,5 м и установку этого телескопа в горах Кавказа, около г. Кисловодска. Письмо с такой просьбой было подписано ректором МГУ академиком В.А. Садовничим, министром образова-



Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ: купол башни 2,5-метрового телескопа, а также два купола, где размещены 60-см дистанционно управляемый телескоп и 40-см телескоп. На переднем плане видны научные лабораторные, бытовые и инженерно-хозяйственные корпуса. Общая площадь всех строений 4160 м². Фотография из архива ГАИШ МГУ

ния и науки А.А. Фурсенко и президентом РАН Ю.С. Осиповым. Правительство РФ положительно отнеслось к этой просьбе, и в конце 2005 г. были выделены необходимые финансовые ресурсы. Немаловажную роль при этом сыграло то обстоятельство, что в 2005 г. МГУ им. М.В. Ломоносова отмечал 250-летие со дня своего основания. Далее последовал выбор фирмы-изготовителя для 2,5-метрового телескопа (французская фирма SAGEM/REOSC), составление соответствующего технического задания и заключение контракта на изготовление телескопа.

Параллельно с изготовлением телескопа руководство ГАИШ вело активную работу с Правительством РФ по финансовому обеспечению капитального строительства на территории новой обсерватории: башни телескопа, научных, жилищных и инженерно-технических сооружений, а также отрезка дороги, ведущей на вершину горы, где размещается обсерватория. Велись также работы по проектированию зданий и сооружений обсерватории. Всему этому серьезно помешал экономический

кризис 2008–2009 гг., но, в конце концов, все трудности были преодолены.

Строительство обсерватории началось в июле 2011 г. Официальное открытие Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (КГО ГАИШ МГУ) состоялось 13 декабря 2014 г.

Кавказская горная обсерватория МГУ расположена в урочище Шатджатмаз Малокарачаевского района Карачаево-Черкесской республики РФ. Выделенный местными властями земельный участок площадью 8,7 га находится в центральном секторе Большого Кавказа на высоте около 2100 м над уровнем моря в 27 км к югу от г. Кисловодска. Обсерватория соседствует с Кисловодской горной астрономической станцией ГАО РАН. Руководство станции и ГАО РАН всегда активно помогало нам при решении вопросов, связанных со строительством, за что ГАИШ МГУ выражает свою признательность.

Площадь всех построек (башня 2,5-метрового телескопа с пристройкой, лабораторные корпуса, гостиница со столовой, конференц-зал на 50 мест, механические мастерские, инженер-

ное, энергетическое и автохозяйство) составляет около 4160 м². Напомним, что все главное здание ГАИШ в Москве на Воробьевых горах занимает 4600 м².

С 2007 г. на КГО ГАИШ МГУ ведутся систематические астроклиматические исследования с помощью автоматизированного комплекса ASM, состоящего из небольшого телескопа-робота, измеряющего параметры мерцания звезд, созданного в ГАИШ под руководством В.Г. Корнилова. Наблюдения показали, что в среднем количество наблюдательного времени в обсерватории равно 1222 час/год – примерно 180–200 ясных ночей в год. Качество изображения (по медиане) составляет 0,96 секунды дуги. При этом количество наблюдательного времени с качеством изображения лучше 0,6 секунды дуги ~10%. Наиболее благоприятное время для наблюдений – с августа по март. Яркость ночного безлунного неба в обсерватории составляет в среднем $21,0 \pm 0,3^m$ с квадратной секунды дуги в фильтре V.

Основной инструмент обсерватории – 2,5-метровый альт-азимутальный зеркальный телескоп системы Ричи–Кретьена с гиперболическим главным зеркалом. Зеркало выполнено из церодура (стеклянная керамика, производимая фирмой «Schott» в Майнце, Германия) с практически нулевым коэффициентом расширения. Телескоп обеспечивает концентрацию 80% световой энергии в изображении звезды в пределах кружка диаметром 0,3 секунды дуги в режиме двухзеркальной

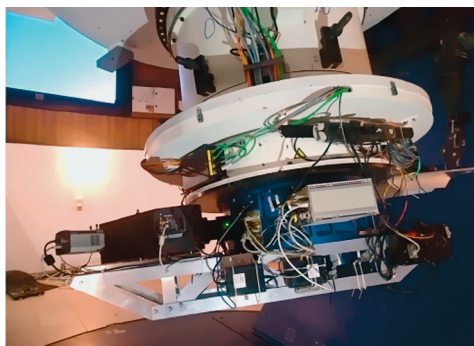
системы Ричи–Кретьена, что соответствует лучшим мировым стандартам. Диаметр без абберационного поля зрения телескопа составляет 10 угловых минут без линзового фокального корректора и до 40 угловых минут с трехлинзовым кварцевым корректором. Телескоп имеет кассегреновский фокус и 4 фокуса Несмита. Скорость наведения телескопа 3 градуса/сек.

Как часто бывает при монтаже крупных телескопов, на начальном этапе эксплуатации 2,5-метрового телескопа выяснилось, что ряд его электромеханических узлов, а также программное обеспечение для наведения и автоматического гидирования телескопа нуждаются в существенной доработке. Поэтому параллельно с наблюдениями велась работа по усовершенствованию различных узлов телескопа, которая, благодаря активным усилиям нового директора ГАИШ профессора К.А. Постнова, заместителя директора А.А. Белинского, заведующих лабораториями Н.И. Шатского и В.Г. Корнилова – к настоящему времени близка к завершению.

Навесными приборами являются: оптическая фотометрическая ПЗС-камера, инфракрасная камера – фотометр-спектрограф, камера спектр-поляриметр. В самое последнее время

2,5-метровый телескоп
в башне с открытыми
створками. Справа – башня
60-см дистанционно
управляемого телескопа.
Архив ГАИШ МГУ





Область касегреновского фокуса 2,5-метрового телескопа с двухканальным спектрографом. Архив ГАИШ МГУ

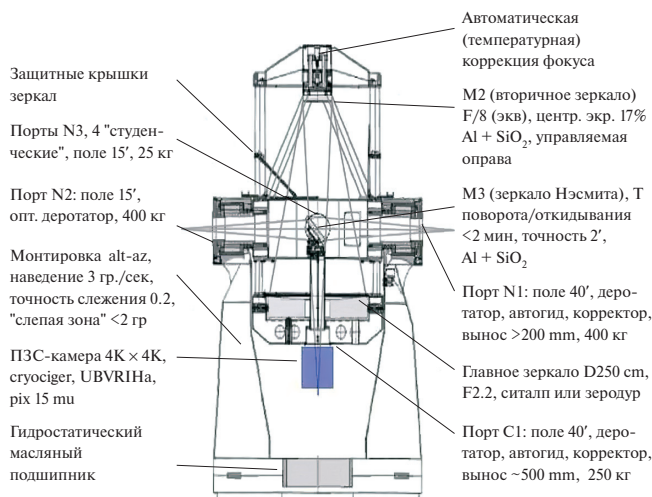
2,5-метровый телескоп силами сотрудников ГАИШ (С.А. Потанин) удалось оснастить двухканальным спектрографом с разрешением $\lambda/\Delta\lambda \approx 2500$ для «красного» канала и 1500 для «синего» канала. Кроме того, в 2018 г., благодаря активности А.А. Белинского и помощи со стороны руководства МГУ (в рамках программы развития МГУ) в КГО ГАИШ МГУ был установлен полностью автоматизированный 60-см телескоп с ПЗС-камерой, управляемый дистан-

ционно из Москвы, на котором ведутся регулярные фотометрические наблюдения.

Телескоп с зеркалом диаметром 2,5-м по современным меркам является сравнительно скромным инструментом, однако он очень хорош для развития университетской науки. Его можно эффективно использовать для подготовки специалистов-астрономов высокого класса на астрономическом отделении физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, а также для научных исследований в области физики звезд, планет (включая экзопланеты), физики галактик, внегалактической астрономии и для наземной поддержки российских и международных космических программ, содействия различным направлениям современной многоканальной астрономии (исследования гравитационных волн, черные дыры, нейтрино и др.).

Здесь мы изложим результаты наблюдений, выполненных на Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ по программе исследований рентгеновских двойных систем.

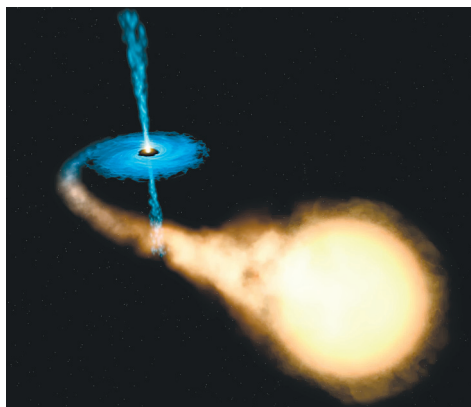
Общий вид телескопа с зеркалом диаметром 2,5 метра. Архив ГАИШ МГУ



РЕНТГЕНОВСКИЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ

Рентгеновскими двойными называются тесные двойные системы (ТДС), состоящие из оптической звезды-донора вещества и релятивистского объекта, нейтронной звезды (НЗ) или черной дыры (ЧД), на который идет аккреция (выпадение) вещества.

Рентгеновские двойные начали активно изучаться в середине 1960-х – начале 1970-х гг. как теоретически (имеются в виду основополагающие работы академика Я.Б. Зельдовича и его учеников по теории аккреции), так и наблюдательно после запуска 12 декабря 1970 г. на околоземную орбиту американской специализированной рентгеновской обсерватории «Ухуру» (UHURU), или SAS-A. До недавнего времени именно рентгеновские двойные системы были главным источником получения информации о массах звездных черных дыр (ЗиВ, 2010, № 3; 2016, № 4; 2018, № 1). Однако сейчас стало ясно, что «пальма первенства» в измерениях масс ЧД переходит от рентгеновских двойных к гравитационно-волновым двойным системам, открываемым по всплескам гравитационно-волнового излучения от слияния двойных ЧД (ЗиВ, 2018, №№ 3, 4). Действительно, за более чем полвека исследований рентгеновских двойных систем ученым удалось измерить массы всего лишь около трех десятков звездных ЧД (по движению оптических компонент и с использованием закона тяготения Ньютона). В то же время, лишь за несколько лет гравитационно-волновых наблюдений на обсерваториях LIGO и VIRGO (2015–2019 гг.) открыто много десятков гравитационно-волновых двойных систем и измерены массы свыше сотни звездных ЧД (!).



*Художник изобразил черную дыру с орбитальной звездой-спутником, которая превышает свой предел Роша. Масса от звезды-компаньона притягивается к черной дыре, образуя аккреционный диск
По данным NASA/ESA*

Тем не менее, проблема исследования рентгеновских двойных систем не потеряла своей актуальности. Дело в том, что в гравитационно-волновых двойных системах открываются в основном ЧД больших масс (до $\sim 50 M_{\odot}$). В то же время рентгеновские двойные системы несут информацию о ЧД сравнительно малых масс ($4 \div 16 M_{\odot}$). Поэтому исследования рентгеновских двойных и гравитационно-волновых систем прекрасно взаимно дополняют друг друга, что позволяет изучать спектр масс ЧД в широком диапазоне – от $\sim 4 M_{\odot}$ до $\sim 50 M_{\odot}$. Нет нужды говорить о колоссальной важности этих данных для релятивистской астрофизики и теории эволюции звезд. Кроме того, в рентгеновских двойных системах наблюдаются различные нестационарные процессы, изучение которых представляет самостоятельный интерес для релятивистской астрофизики. В частности, в особом классе рентгеновских двойных систем – рентгеновских новых, когда они находятся

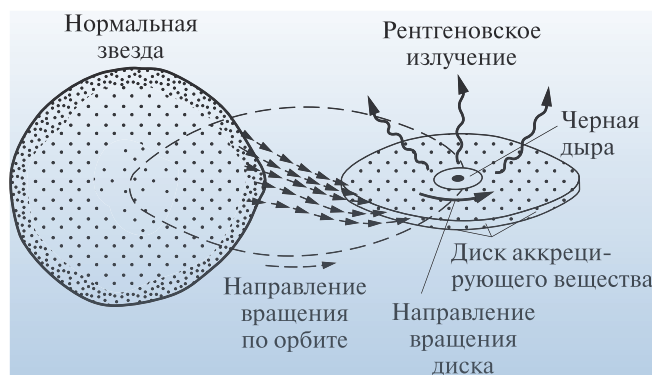
в спокойном состоянии, наблюдаются так называемые адвекционно-доминированные диски вокруг релятивистских объектов с ничтожно малой рентгеновской светимостью. Такие же диски существуют и вокруг сверхмассивных ЧД в неактивных ядрах галактик (число которых превышает 90% от общего числа галактик). Поэтому наблюдательное изучение структуры аккреционных дисков вокруг ЧД в рентгеновских двойных системах представляет собой самостоятельную актуальную задачу.

ТИПЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Массивные рентгеновские двойные.

Рентгеновские двойные подразделяются на два больших класса по массам звезд-доноров. В массивных рентгеновских двойных системах оптическая звезда-донор вещества является массивной звездой с массой более $5-7 M_{\odot}$. Движущей силой эволюции таких систем является ядерная эволюция компонент и связанное с ней эволюционное увеличение радиусов звезд. На начальном этапе система состоит из двух массивных звезд с небольшим различием в массах. Первоначально более массивная звезда эволюционирует быстрее своей соседки и первой заполняет свою внутреннюю критическую полость Роша (далее – просто полость Роша).

Под действием приливных сил начинается истечение вещества более массивной звезды через внутреннюю точку Лагранжа L_1 . Вещество оседает на второй звезде и увеличивает ее массу. При перетекании вещества от более массивной к менее массивной звезде расстояние между компонентами уменьшается, что стимулирует перенос вещества, поэтому время первичного обмена масс почти на три порядка короче времени ядерной эволюции звезды. Важно то, что во время первичного обмена масс общая оболочка не образуется, и система эволюционирует как полуразделенная. На месте первоначально более массивной звезды образуется гелиевая звезда с мощным звездным ветром – звезда Вольфа–Райе (WR). Через несколько сотен тысяч лет звезда WR коллапсирует и формирует релятивистский объект (НЗ или ЧД). Далее, вторая звезда системы, нарастившая массу, расширяется, приближается к границам своей полости Роша и начинает истекать на релятивистский объект, вокруг которого образуется аккреционный диск. В центральных частях аккреционного диска скорости движения вещества достигают скоростей, близких к скорости света. Взаимное трение и столкновение потоков газа приводит к разогреву плазмы до температур в десятки миллионов градусов и формированию мощного компактного рентгеновского источника. Теория



дисковой аккреции вещества на релятивистские объекты была разработана в 1972–1973 гг. в работах Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева, Дж. Прингла и М. Риса,

Формирование аккреционного диска в рентгеновской двойной системе в представлении художника

И.Д. Новикова и К.С. Торна. В итоге на месте начальной массивной ТДС образуется массивная квазистационарная рентгеновская двойная система типа CygX-1, CenX-3 и др.

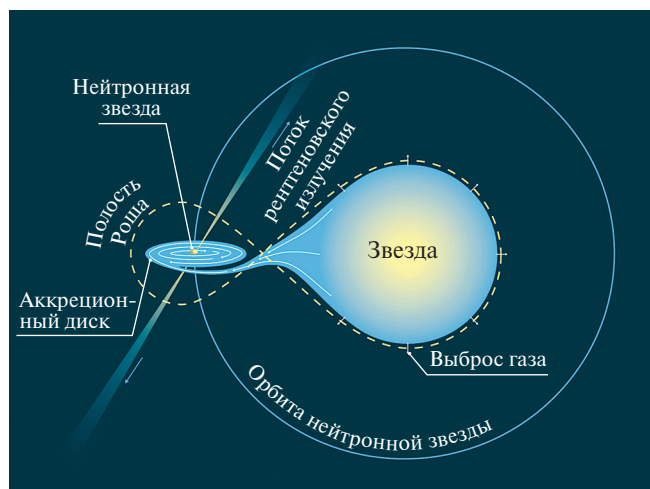
Если при первичном обмене масс звезда-реципиент (получатель вещества) наряду с массой аккумулирует значительный угловой момент и становится быстро вращающейся Ве-звездой, то она формирует в экваториальной плоскости сравнительно плотную газовую дискообразную оболочку, вещество которой также может «питать» аккрецию на релятивистский объект. В этом случае задолго до заполнения Ве-звездой своей полости Роша в системе формируется мощный транзитный (вспышечный) рентгеновский источник – это массивные рентгеновские транзиенты. Вспышки рентгеновского излучения в таких системах происходят из-за усиления темпа аккреции вещества, когда релятивистский объект при орбитальном движении по эллиптической орбите попадает в наиболее плотные слои экваториальной околосредней оболочки Ве-звезды.

Когда и вторая звезда заканчивает свою эволюцию, чаще всего образуется пара релятивистских объектов ($H3 + H3$, $H3 + ЧД$, $ЧД + ЧД$), дальнейшее сближение которых из-за потери энергии в виде излучения гравитационных волн приводит к их слиянию и формированию всплеска гравитационно-волнового излучения. Эволюция массивных ТДС вплоть до самых поздних стадий была изучена в 1972–1976 гг. в работах А.В. Тулукова, Л.Р. Юнгельсона и Е. Ван ден Хейвела.

Маломассивные рентгеновские двойные системы.

Масса звезды-донора в маломассивных рентгеновских двойных системах порядка или менее $1 M_{\odot}$. Для звезд с массами менее $0,8 M_{\odot}$ время ядерной

эволюции больше возраста Вселенной ($1,4 \times 10^{10}$ лет). Если такая звезда входит в состав рентгеновской двойной, то ядерной эволюцией этой звезды можно пренебречь; ее радиус не растет. Поэтому главной движущей силой эволюции маломассивных рентгеновских двойных систем является потеря энергии и углового момента системой под влиянием истекающего из звезды намагниченного звездного ветра и излучения двойной системой потока гравитационных волн. Такая потеря системой энергии орбитального движения компонент приводит к сокращению расстояния между компонентами и, в конце концов, по прошествии миллиардов лет, полость Роша «садится» на звезду малой массы. В системе начинается вторичный обмен масс, в результате чего вокруг релятивистского объекта формируется аккреционный диск, что может приводить к формированию мощного компактного рентгеновского источника. На начальном этапе система состояла из массивной звезды ($M > 8 \div 10 M_{\odot}$), предшественника релятивистского объекта, и маломассивного спутника ($M \lesssim 1 M_{\odot}$). Релятивистская компонента в маломассивных рентгеновских двойных сформировалась ранее, на конечной стадии эволюции первичной, изначально массивной ($M \gtrsim 8 \div 10 M_{\odot}$) звезды системы. При этом, вследствие большого различия в начальных массах компонент, первичный обмен масс происходил не в виде полуразделенной двойной системы (как это имеет место в массивных рентгеновских двойных), а в виде стадии эволюции с общей оболочкой, окружающей двойную систему. Потеря энергии и углового момента системой из-за динамического трения звезд в этой оболочке приводит к резкому сокращению радиуса орбиты двойной системы, а общая оболочка рассеивается в окружающее межзвездное



Маломассивная рентгеновская двойная система с обычной звездой, заполнившей свою полость Роша. Рисунок NASA

пространство. Стадия эволюции с общей оболочкой может реализоваться и в массивных рентгеновских двойных системах, когда осуществляется вторичный обмен масс и различие в массах компонент велико. В конце такой стадии может сформироваться либо тесная пара релятивистских объектов, либо так называемый объект Торна-Житков – полностью конвективный красный сверхгигант с релятивистским объектом в центре, который также в конце концов порождает релятивистский объект, скорее всего ЧД.

Как и в случае массивных рентгеновских двойных систем, маломассивные рентгеновские двойные бывают либо квазистационарными (например, системы ScoX-1, CygX-2), либо транзистными (системы типа A0620-00, XTEJ1118+480 и др.). К классу транзистных маломассивных рентгеновских двойных принадлежат рентгеновские новые. В этих системах спорадически, в среднем раз в несколько лет, происходят мощные вспышки рентгеновского излучения длительностью порядка

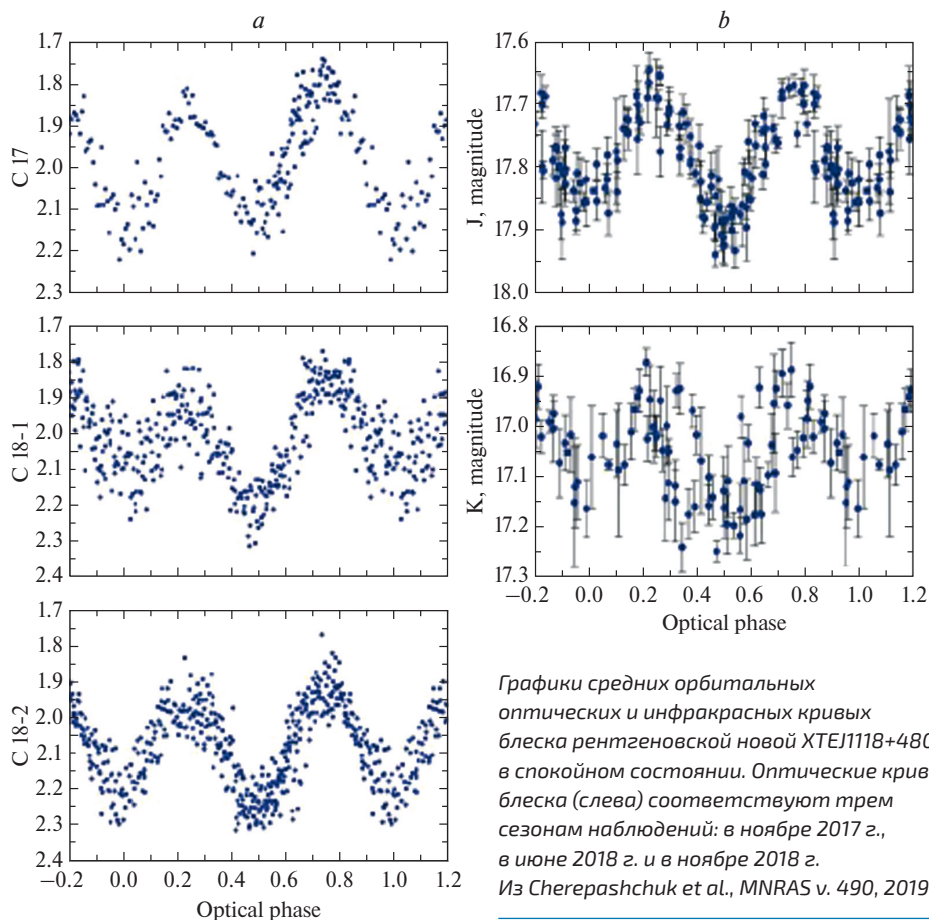
месяца или нескольких месяцев. Такие вспышки – следствие различных неустойчивостей в аккреционном диске, приводящих к усилению турбулентной вязкости вещества и усилению темпа аккреции на центральный релятивистский объект.

Удивительной особенностью рентгеновских новых является то, что в спокойном состоянии, когда рентгеновская светимость пренебрежимо мала, во-

круг релятивистского объекта продолжает оставаться вращающийся газовый диск. Это доказывается наличием двугорбых профилей линий излучения водорода в спектрах «спокойных» рентгеновских новых, что характерно именно для вращающихся газовых дисков. То есть диск из вещества вокруг релятивистского объекта наблюдается, а рентгеновское излучение почему-то не формируется. Существует несколько гипотез для объяснения этого очень интересного феномена: адвекционно-доминированный диск, ламинарный диск-накопитель и т.п., однако ни одна из них к настоящему времени не считается доказанной.

НАБЛЮДЕНИЯ МАЛОМАССИВНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Мы выполнили фотометрические наблюдения двух рентгеновских новых в спокойном состоянии: A0620-00 в созвездии Единорога (3 тыс. св. лет от нас) и XTEJ1118+480 в созвездии Большой Медведицы (6 тыс. св. лет от нас), которые выполнены в оптическом ($\lambda_{эф} \cong 6400 \text{ \AA}$) и инфракрасном диапазонах (фильтры J, $\lambda_{эф} = 1,25 \text{ мкм}$ и



Графики средних орбитальных оптических и инфракрасных кривых блеска рентгеновской новой XTEJ1118+480 в спокойном состоянии. Оптические кривые блеска (слева) соответствуют трем сезонам наблюдений: в ноябре 2017 г., в июне 2018 г. и в ноябре 2018 г. Из Cherepashchuk et al., MNRAS v. 490, 2019

К, $\lambda_{\text{эф}} = 2,2$ мкм). Инфракрасные наблюдения выполнены на 2,5-метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ, а оптические – на 1,25-метровом телескопе ЗТЭ Крымской станции ГАИШ.

Рентгеновская новая XTEJ1118+480 (оптический аналог – звезда KVUMa переменная звезда в созвездии Большой Медведицы) в спокойном состоянии имеет очень низкую рентгеновскую светимость $L_X < 10^{51}$ эрг/с (в максимуме вспышки L_X повышается примерно в миллион раз). Это система, содержащая черную дыру, вокруг которой вращается с периодом 0,17 суток ($\sim 4,1$ часа) красный карлик спектрального класса K7 ÷ M0, заполняющий свою полость Роша. Средний

блеск системы в фильтре V составляет $\sim 19^m$. Блеск системы, как в оптике, так и в ИК-диапазонах, испытывает регулярную орбитальную переменность – двойную волну за орбитальный период, что связано с эффектом эллипсоидальности оптической К-М звезды и с переменным вкладом незвездных компонент излучения: диска и области взаимодействия газовой струи с внешними частями диска.

Наблюдения выполнены в 2017–2018 гг. в оптическом диапазоне (~ 600 индивидуальных наблюдений, точность $\sim 0,02^m$) и в ИК-диапазоне (по ~ 500 индивидуальных наблюдений в фильтрах J и K, точность $\sim 0,02 \div 0,03^m$).

Рентгеновская новая A0620-00 (оптический аналог – звезда V616Mon

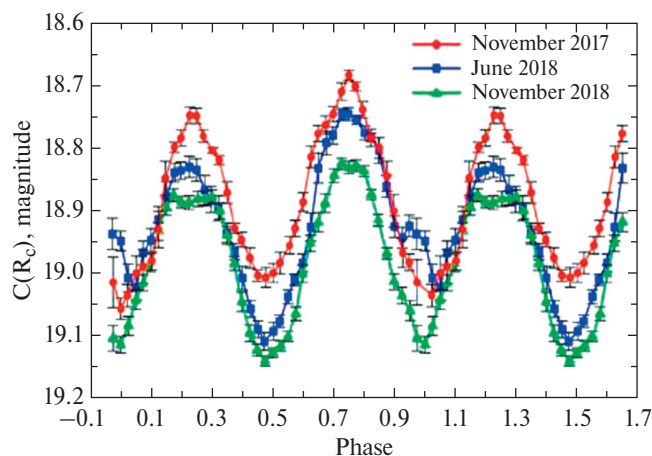


График медленных изменений среднего оптического блеска системы XTEJ1118+480, наложенных на орбитальную переменность и обусловленных переменностью характеристик не звездной компоненты излучения (диск с областью взаимодействия газовой струи с внешней границей диска).
Из Cherepashchuk et al.,
MNRAS v. 490, 2019

переменная звезда в созвездии Единорога) также имеет очень низкую рентгеновскую светимость в спокойном состоянии ($L_x < 10^{31}$ эрг/с). Эта система содержит черную дыру и звезду-донор — красный карлик спектрального класса K3/4, заполняющий свою полость Роша. Орбитальный период системы 0,32 суток ($\sim 7,7$ часов), средний блеск системы $V \cong 18^m$. Наблюдения выполнены в 2015–2017 гг. в оптическом диапазоне (около 3400 индивидуальных наблюдений, точность $\sim 0,01^m$) и в ИК-диапазоне (по ~ 600 индивидуальных наблюдений в фильтрах J, K, точность $\sim 0,02^m$).

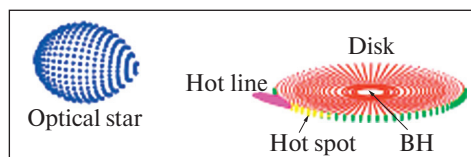
Средние орбитальные кривые блеска системы XTEJ1118+480 в оптическом и ИК-диапазонах показывают двойную волну за орбитальный период. Оптические наблюдения были разбиты на три эпохи: ноябрь 2017 г., июнь 2018 г. и ноябрь 2018 г. Это сделано для сравнения среднего за орбитальный период блеска системы. Средний блеск системы с ноября 2017 г. по ноябрь 2018 г. монотонно спадал, так что система в среднем ослабела на $\sim 0,1^m$ к 2018 г., что сравнимо с амплитудой регулярной орбитальной переменности ($\sim 0,3^m$). Естественно связать оптическую переменность среднего блеска системы

с переменностью не звездной компоненты: диск плюс область взаимодействия диска с газовой струей, истекающей из звезды-донора. Такая переменность кажется удивительной: ведь рентгеновский поток от системы очень мал, в то же время оптическая светимость не звездной компоненты излучения значительно меняется на временах порядка месяцев. Оптическая звезда в системе XTEJ1118+480 — красный карлик спектрального класса K-M, у которого должна существовать значительная поверхностная активность: пятна, факелы, активные области и т.п. Установлено, что, скорее всего, медленные изменения оптической светимости не звездной компоненты «отслеживают» активность звезды-донора. Поскольку темп истечения вещества через точку Лагранжа L_1 очень сильно зависит от степени переполнения оптической звездой своей полости Роша, попадание активных областей звезды-донора в точку L_1 может либо усиливать, либо блокировать (например посредством влияния магнитных полей) темп истечения этой звезды. Это должно приводить к изменениям оптической светимости диска (из-за изменения выделения гравитационной энергии в нем) и к переменности свети-

мости области взаимодействия диска и газовой струи.

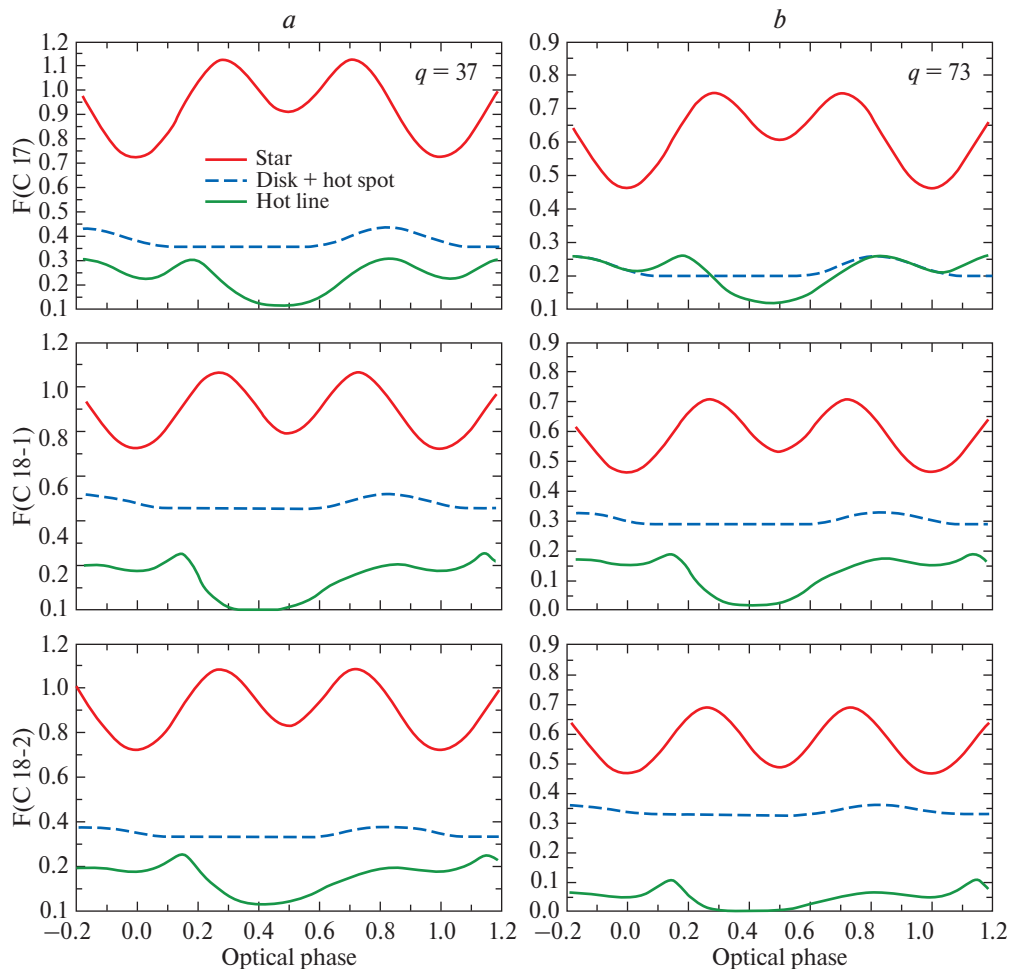
Интерпретация орбитальных оптических и инфракрасных кривых блеска выполнена нами в рамках математической модели взаимодействующей двойной системы со сложной областью взаимодействия диска и газовой струи. В этой модели звезда-донор заполняет свою полость Роша и имеет сложное распределение температуры по поверхности. Область взаимодействия диска со струей аппроксимируется совокупностью горячей линии, расположенной вдоль газовой струи, и горячего пятна, лежащего на внешней границе диска. Нагрев вещества горячей линии осуществляется при сверхзвуковом обтекании струи внешними вращающимися частями диска. Вещество струи, нагретое в косой ударной волне, затем присоединяется к аккреционному диску, образуя горячее пятно. Такая модель области взаимодействия соответствует современным трехмерным газодинамическим расчетам течения газа во взаимодействующих двойных системах, выполненных в работах группы Д.В. Бисикало и группы Н.И. Шакуры.

С использованием такой модели, из совместного анализа оптических и инфракрасных кривых блеска нам удалось оценить наклонение орбиты системы XTEJ1118+480: $i = 74 \pm 4^\circ$ и массу черной дыры $M_{\text{BH}} = 7,1 \pm 1 M_\odot$. Поскольку при интерпретации кривых блеска в каждом диапазоне мы разлагаем суммарный переменный блеск системы на отдельные компоненты (звезда-донор, диск с горячим пятном, горячая линия), то смогли восстановить спектр незвездной компоненты системы в диапазоне 6400–22000 Å, что очень важно для тестирования теории адвекционно-доминированных дисков. Этот спектр можно аппроксимировать степенным законом $F_\lambda \sim \lambda^{-1,6}$.



*Математическая модель взаимодействующей двойной системы, применяемая для интерпретации оптических и ИК средних кривых блеска рентгеновских новых в спокойном состоянии. Здесь optical star – звезда-донор вещества, заполняющая свою полость Роша, Disk – диск вокруг черной дыры (BH), Hot line – горячая линия, Hot spot – горячее пятно на внешней границе диска (обозначено желтым цветом).
Из Cherepashchuk et al., MNRAS v.490, 2019*

Рентгеновская новая XTEJ1118+480 имеет очень большую высоту над плоскостью Галактики $z \cong 1,7$ кпк. Это может быть связано со взрывом сверхновой при формировании черной дыры, благодаря которому центр масс двойной системы получил большую пространственную скорость – порядка сотни км/с. Кроме того, у некоторых рентгеновских новых с черными дырами в спокойном состоянии в спектрах маломассивных звезд-доноров наблюдаются линии так называемых α -элементов (кислорода, кальция, магния и т.п.), которые не могут формироваться в недрах маломассивных звезд. Обогащение атмосфер маломассивных звезд-доноров α -элементами, по-видимому, произошло при обтекании этих звезд обогащенной α -элементами оболочкой сверхновой звезды, сопутствующей образованию черной дыры. Таким образом, рентгеновские новые с черными дырами дают нам важные свидетельства о том, что, по крайней мере, в некоторых случаях, черные дыры образуются не в результате так называемого «тихого» коллапса ядра массивной звезды, а их образование сопровождается взрывами сверхновых. То есть

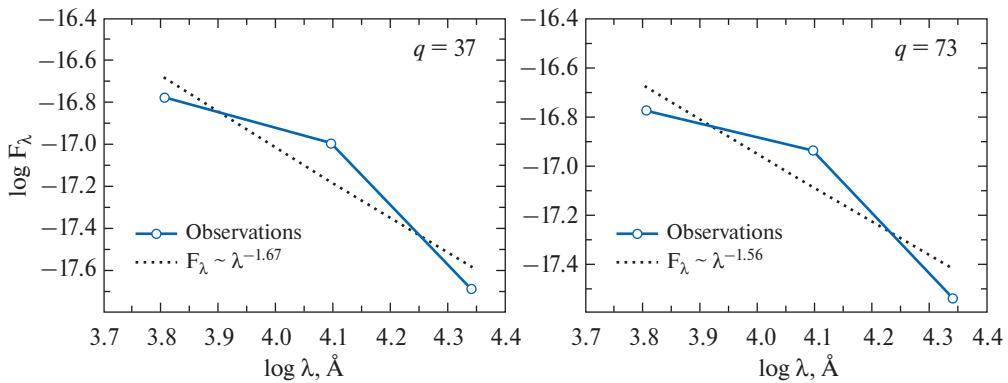


Графики оптических кривых блеска различных компонент рентгеновской двойной XTE J1118+480, восстановленные в результате интерпретации средних кривых блеска системы при двух значениях отношения масс компонент: 1 – звезда-донор, 2 – диск с горячим пятном, 3 – горячая линия. Из Cherepashchuk et al., MNRAS v. 490, 2019

не вся масса ядра массивной звезды коллапсирует в черную дыру. Этот вывод важен для построения адекватных сценариев эволюции массивных ТДС, приводящих к образованию гравитационно-волновых двойных систем.

Наблюдения рентгеновской двойной системы A0620-00 в оптическом и ИК-диапазонах были получены в 2015–2017 гг. Как и в случае системы XTE J1118+480, средний блеск системы за время примерно один год существен-

но изменился. Система в 2016–2017 гг. стала ярче на $\sim 0,2^m$, что сравнимо с амплитудой орбитальной переменности ($\sim 0,3^m$), при этом на регулярной кривой блеска появилась сильная быстрая нерегулярная переменность – фликеринг (нестационарные процессы в области взаимодействия струи и диска). Амплитуда фликеринга порядка амплитуды орбитальной кривой блеска. Важно подчеркнуть, что в упомянутой выше системе XTE J1118+480 при изменении



Спектры излучения диска с горячим пятном для системы XTE J1118+480 в диапазоне $\lambda 6400 \div 22\,000\text{ \AA}$, восстановленные в результате интерпретации оптических и инфракрасных кривых блеска при значениях отношения масс $q = 37$ и 73 . Спектр может быть аппроксимирован степенной функцией $F_\lambda \sim \lambda^{-1.6}$. Из Cherepashchuk et al., MNRAS v. 490, 2019

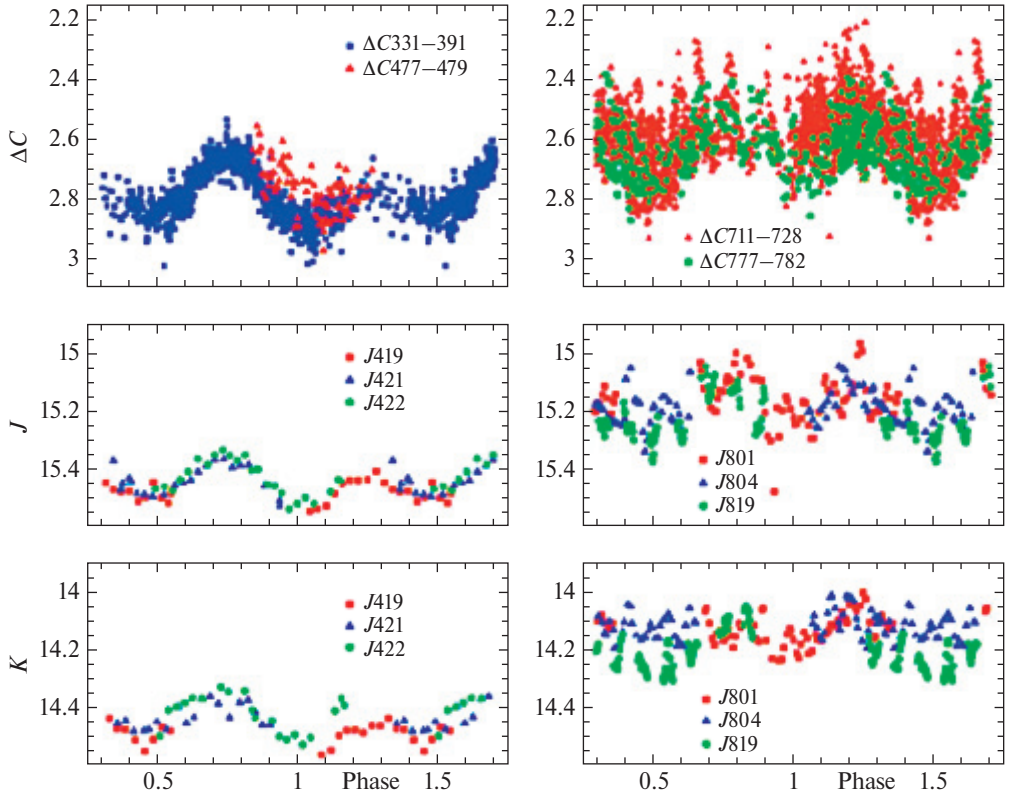
среднего блеска фликеринг не появлялся. Таким образом, возникновение фликеринга при увеличении среднего блеска системы не является особенностью всех рентгеновских новых в спокойном состоянии. Явление фликеринга – сугубо индивидуальный эффект, характерный лишь для отдельных рентгеновских новых.

Интерпретация оптических и инфракрасных кривых блеска системы A0620-00 позволила восстановить спектр незвездной компоненты в диапазоне $\lambda = 6400 \div 22\,000\text{ \AA}$ как для пассивной стадии (низкий средний блеск системы, слабый фликеринг), так и для активной стадии (высокий блеск системы, сильный фликеринг). Спектры незвездной компоненты могут быть аппроксимированы степенными законами: $F_\lambda \sim \lambda^{-2.1}$ для пассивной стадии и $F_\lambda \sim \lambda^{-1.9}$ для активной стадии. Как уже отмечалось, эти данные важны для проверки теории адвекционно-доминированных дисков.

Отдельно нами был изучен фликеринг и его зависимость от длины волны для пассивной и активной стадий A0620-00. В активной стадии амплитуда фликеринга велика, она моно-

тонно убывает с увеличением длины волны. Это отражает тот факт, что вклад незвездной компоненты излучения убывает с увеличением длины волны: в ИК-диапазоне доминирует излучение красного К-М карлика. В то же время в пассивной стадии зависимость амплитуды фликеринга от длины волны немонотонна: фликеринг максимален в оптическом диапазоне, затем он убывает для диапазона J ($\lambda = 1,25\text{ мкм}$) и далее он снова возрастает для диапазона K ($\lambda = 2,2\text{ мкм}$). Этот интересный наблюдательный факт требует дальнейшего подтверждения и физической интерпретации. Возможно, в фильтре K в пассивной стадии начинает проявляться фликеринг от нестационарных процессов в релятивистском джете, истекающем из центральных частей диска. Недавно была обнаружена переменная линейная поляризация от нескольких рентгеновских новых в спокойном состоянии, что может свидетельствовать о синхротронном излучении от релятивистских джетов, которые присутствуют даже тогда, когда рентгеновская светимость системы пренебрежимо мала.

Мы восстановили зависимости абсолютных амплитуд фликеринга от

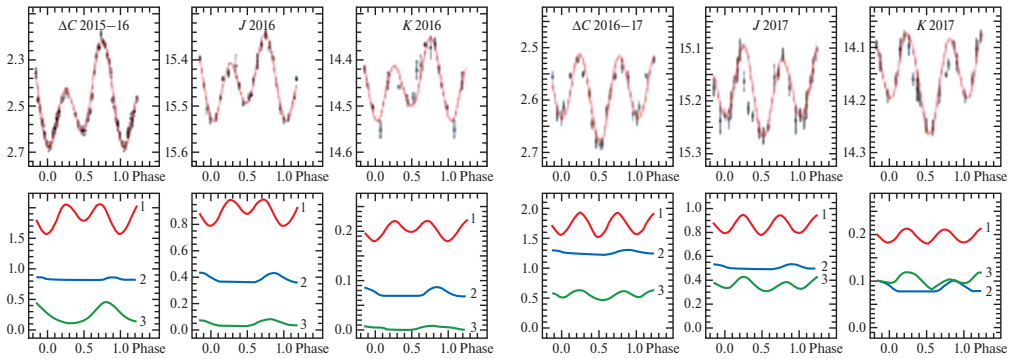


Графики оптических и инфракрасных орбитальных средних кривых блеска рентгеновской новой A0620-00 в спокойном состоянии для пассивной стадии системы, полученные в 2015–2016 гг. (слева) и для активной, полученные в 2016–2017 гг. (справа). Представлены наблюдаемые кривые блеска A0620-00 (точки). Видно увеличение среднего блеска системы в активной стадии, обусловленное переменностью излучения незвездной компоненты (диск с областью взаимодействия струи и диска). Видно также сильное увеличение фликеринга в активной стадии системы. Из Cherepashchuk et al., MNRAS v. 483, 2019

длины волны для пассивной и активной стадий, которые могут быть аппроксимированы степенным законом: $F_{\lambda}^{\text{pl}} \sim \lambda^{-2.4}$ для пассивной и активной стадий.

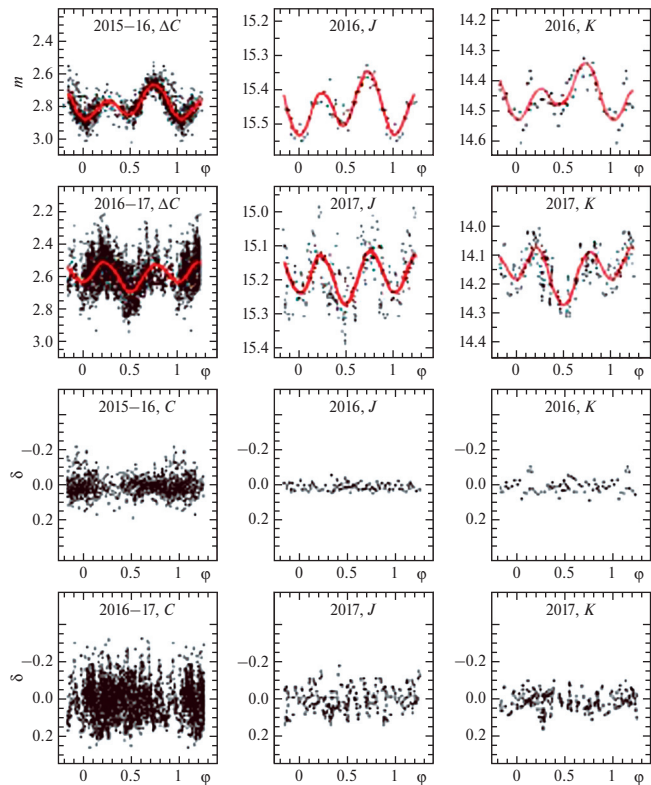
Недавно было открыто аномально быстрое укорочение орбитальных периодов у ряда маломассивных рентгеновских двойных систем с черными дырами и нейтронными звездами. Мы выполнили анализ эволюции таких систем. Показано, что этот новый эффект

может быть связан со значительным усилением магнитного поля маломассивной звезды-донора во время стадии эволюции системы с общей оболочкой. Сильное магнитное поле звезды-донора приводит к истечению усиленного магнитного звездного ветра из этой звезды. Это вызывает значительную потерю энергии орбитального движения компонент и, как следствие, к усиленному укорочению орбитального периода рентгеновской двойной.



Оптимальные теоретические орбитальные кривые блеска системы A0620-00, наложенные на наблюдаемые кривые (точки) для оптического и ИК-диапазонов и для двух стадий активности системы: пассивной (слева) и активной (справа). Внизу показаны кривые блеска отдельных компонент системы, восстановленные при интерпретации наблюдаемых кривых блеска: 1 – звезда-донор, 2 – диск с горячим пятном, 3 – горячая линия. Видно радикальное изменение формы средних орбитальных кривых блеска A0620-00 при переходе от пассивной стадии к активной, а также увеличение светимости всех компонент не звездного излучения системы в активной стадии. Из Cherepashchuk et al., MNRAS v. 483, 2019

Графики эволюции системы A0620-00: сверху – наблюдаемые орбитальные кривые блеска с наложенными на них оптимальными теоретическими кривыми для пассивной стадии системы (сверху, оптический и ИК-диапазоны) и активной стадии (внизу, также оптический и ИК-диапазоны); внизу – «чистый» фликеринг излучения системы A0620-00 для разных спектральных диапазонов и для двух стадий активности системы: пассивной (сверху) и активной (внизу), полученный вычитанием из наблюдаемых кривых блеска теоретических кривых. Видно немонотонное изменение амплитуды фликеринга в пассивной стадии при переходе от оптического к ИК-диапазону. Из Cherepashchuk et al., MNRAS v. 483, 2019



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ввиду ограниченности объема статьи мы изложили лишь часть результатов по программе наблюдений рентгеновских двойных систем, выполняемых на КГО ГАИШ МГУ и Крымской станции ГАИШ. В частности, нами получены интересные результаты по наблюдениям массивных рентгеновских двойных систем (системы CygX-3, SS433 и другие). Хочется поблагодарить участников нашей программы, являющихся соавторами соответствующих научных статей: В.Ф. Есипова, И.И. Антохина, Э.А. Антохину, А.В. Додина, А.М. Татарникова, Н.И. Шатского, Т.С. Хрузину, Н.А. Катышеву, М.А. Бурлак, С.Ю. Шугарова, А.И. Богомазова, К.А. Постнова, А.А. Белинского.

На Кавказской горной обсерватории успешно ведутся также и другие наблюдательные программы. В частности, программа по исследованию молодых звезд типа ТТав, для которых используется новый высокотехнологичный приемник с высоким угловым разрешением – спектр-поляриметр, созданный сотрудником ГАИШ Б.С. Сафоновым. Одновременно ведутся такие проекты, как программа инфракрасных наблюдений симбиотических звезд, программа исследований сверхновых звезд, программа мониторинга активных ядер галактик, программа ИК фотометрических и спектральных наблюдений планет и астероидов и др. Особенно важно то, что с 2018 г. 2,5-метровый телескоп КГО оснащен спектрографом высокой эффективности, работающим в диапазоне $\lambda = 3500 \div 7500 \text{ \AA}$. Это позволило значительно расширить круг научных задач, решаемых на КГО ГАИШ МГУ. По материалам наблюдений, выполненных обсерваторией, уже опубликовано много десятков научных статей в журналах с высоким импакт-фактором.

Следует отметить, что КГО ГАИШ МГУ стала не только современным центром научных исследований, но и центром подготовки астрономических кадров высокой квалификации, а также центром популяризации астрономических научных знаний. В обсерватории регулярно проходят астрономическую практику студенты и аспиранты Астрономического отделения физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Здесь проводятся Всероссийские научные конференции по различным разделам астрономии. Многочисленные группы любителей астрономии, в т.ч. из Московского планетария и других регионов России, регулярно приезжают на экскурсии на Кавказскую горную обсерваторию.

Таким образом, можно с удовлетворением заключить, что предпринятые нами многолетние усилия по созданию новой высокогорной обсерватории ГАИШ МГУ, расположенной на российской территории, увенчались успехом.

Важно и то, что, несмотря на распад СССР, нам удалось сохранить Крымскую станцию ГАИШ как российскую обсерваторию. КГО и Крымская станция ГАИШ прекрасно дополняют друг друга по распределениям ясных ночей. Это позволяет вести мониторинг астрономических объектов и проводить студенческую астрономическую практику почти круглый год.

В заключение необходимо отметить важную роль, которую при создании КГО ГАИШ МГУ сыграли члены Комитета по КГО. Этот Комитет был создан в 2005 г. сразу после получения финансирования на изготовление 2,5-метрового телескопа. Руководитель Комитета А.М. Черепашук (директор ГАИШ), члены: Е.К. Шеффер, А.А. Павлов, С.А. Ламзин, А.А. Белинский, В.Г. Корнилов, Н.И. Шатский, С.А. Потанин, В.Ф. Есипов, Б.П. Артамонов. Особая

нагрузка легла на заместителей директора ГАИШ А.А. Павлова, Е.К. Шеффера, С.А. Ламзина и А.А. Белинского. Следует отметить активность члена Комитета Е.К. Шеффера, который, будучи зам. директора по наблюдательным базам ГАИШ, курировал ответственные организационные усилия по созданию новой обсерватории ГАИШ и оснащению ее 2,5-метровым телескопом.

К сожалению, Евгений Карлович Шеффер сравнительно рано (в 70 лет) ушел из жизни и не дожидаясь официального открытия обсерватории (13 декабря 2014 г.). Не исключено, что тяжелая и ответственная работа, связанная с созданием новой обсерватории, подорвала здоровье Евгения Карловича. Мы глубоко чтим память нашего коллеги и соратника.

От редакции

7 июля 2020 года Анатолию Михайловичу Черепашуку – замечательному российскому астроному, академику РАН, научному руководителю Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, многолетнему члену редколлегии и постоянному автору журнала «Земля и Вселенная» – исполнилось 80 лет.

Анатолий Михайлович родился в Сызрани Куйбышевской (ныне Самарской) обл. и прошел путь от школьного любителя астрономии до профессора, академика и директора крупнейшего астрономического института (1986–2018 гг.), а затем – его научного руководителя.

Им получены всемирно известные научные результаты по исследованию физики звезд и звездных систем, релятивистских объектов и активных галактических ядер, а также по решению обратных задач астрофизики. В частности, он открыл оптические затмения в уникальном объекте SS433 – «загадке века» – и показал, что этот объект представляет собой массивную рентгеновскую двойную систему на продвинутой стадии эволюции с прецессирующим сверхкритическим аккреционным диском вокруг вероятной черной дыры. Исследования объекта SS433, выполненные А.М. Черепашуком, привели к выделению нового класса объектов Галактики – микроквazarов.

Анатолий Михайлович опубликовал более 500 научных работ и около 20 монографий и популярных книг, последняя из которых «Многоканальная астрономия» вышла в 2019 г. (см. ЗиВ № 5, 2019). Он активно пропагандирует астрономические знания и борется со лженаукой и воинствующим невежеством, захлестнувшими сегодня средства массовой информации.

За достижения в развитии науки и в области подготовки астрономических кадров Анатолий Михайлович награжден правительственными орденами Дружбы (1999), Почета (2005), а также орденом Александра Невского (2020). В 2008 г. он удостоен Государственной премии Российской Федерации в области науки и технологий. В 2013 г. – премии Правительства РФ в области образования. А.М. Черепашук – лауреат премии имени А.А. Белопольского РАН (2002). Его именем в 1997 г. была названа малая планета Солнечной системы 4307 (Cherepashchuk).

Редакция сердечно поздравляет Анатолия Михайловича со славным юбилеем, желает ему здоровья и новых творческих достижений в его активной научной и организационной деятельности.

НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ



НОВИКОВ Игорь Дмитриевич,

член-корреспондент РАН

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

DOI: 10.7868/50044394820040027

Более полувека тому назад в самом начале моей научной карьеры мне выпало счастье участвовать в создании новой ветви физики и астрофизики – релятивистской астрофизики. До начала шестидесятых годов прошлого века общая теория относительности (ОТО), хотя и признавалась красивейшей физической теорией, вела, как правило, весьма скромную жизнь где-то у окраин теоретической науки. Это было связано с тем, что ни в физике, ни в астрофизике она не была нужна для описания реальных процессов в известных тогда физических и астрофизических объектах.

В последние десятилетия в астрофизике были сделаны открытия удивительных объектов и явлений, которые предсказывались ОТО давным-давно, но вначале были встречены негативно почти всеми специалистами из-за своих крайне необычных свойств. За примерами ходить далеко не надо. Черные дыры (ЧД). Они были предсказаны немецким физиком Карлом Шварцшильдом в 1916 г. Однако почти все физики того времени и последующих десятилетий считали, что этот вывод ОТО является необычным формальным математическим следствием

теории, не имеющим никакого отношения к действительности. Таково было мнение и самого Альберта Эйнштейна.

Позже знаменитый американский физик Кип Торн писал:

«...было ясно, что любой объект, попавший в черную дыру, никогда не сможет вернуться обратно и даже не сможет послать оттуда никакого сигнала. Этого было достаточно, чтобы убедить Эйнштейна и большинство других физиков тех лет в том, что черные дыры – это совершенно противостественные объекты, которым не место в реальном мире. Законы физики, считали они,

должны каким-то образом защищать Вселенную от подобных монстров».

Другой крупнейший специалист по ОТО, известный английский астрофизик Артур Эддингтон в 30-х гг. прошлого века писал по поводу превращения в конце эволюции звезд в ЧД: «...Думаю, должен существовать закон природы, не позволяющий звездам вести себя столь абсурдным образом».

Но постепенно интерес к ЧД, как к важнейшим, интереснейшим выводам ОТО, стал завоевывать свое право на существование среди специалистов. Начали разрабатываться методы их поиска во Вселенной. В семидесятые годы прошлого века ЧД были открыты в двойных звездных системах, а затем и как сверхмассивные компактные объекты в центрах некоторых галактик. Сейчас мы понимаем, что ЧД разного класса играют определяющую роль в эволюции Вселенной.

Отметим, что рассматриваемый объект не сразу получил свое название – «черная дыра». Даже в конце 60-х гг. они назывались по-разному. В нашей стране мы называли их «застывшими звездами» (или «замороженными звездами»). На Западе использовали название «сколлапсировавшие» звезды. Название «черные дыры» было придумано знаменитым американским физиком Джоном Уилером в 1967 г. Оно быстро стало общепринятым.

Обратимся теперь к другому удивительному объекту, давно предсказанному ОТО, но, как и ЧД, поначалу «преданному анафеме». Речь идет о «темной энергии», проявляющейся в уравнениях ОТО как Λ -член.

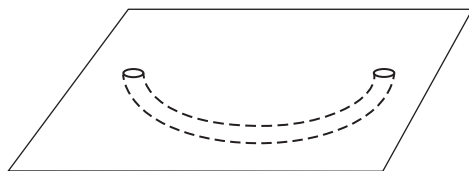
Λ -член в уравнениях Эйнштейна описывает плотность энергии и давление вакуума. Он был добавлен Эйнштейном в свою теорию в 1917 г. для построения статической модели Вселенной.

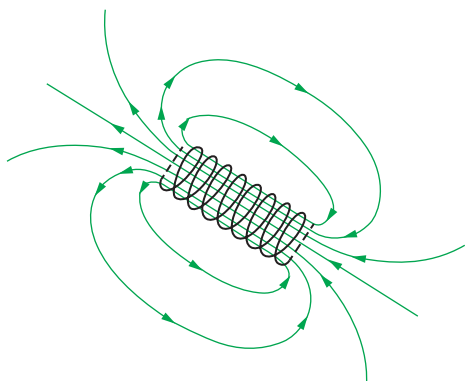
После теоретического открытия российским ученым Александром Фридманом нестационарности Вселенной, а затем открытием американским астрофизиком Эдвином Хабблом разбегания галактик, необходимость в статической модели отпала, а значит, и Λ -член стал не нужен. Сам Эйнштейн посчитал введение Λ -члена в теорию ошибкой. Большинство физиков согласилось с ним. Так, по мнению В.Л. Гинзбурга, Л.Д. Ландау в 50-х и 60-х гг. прошлого века даже слышать не хотел о Λ -члене.

Отметим, что рассматриваемый объект не сразу получил свое название – «черная дыра». Даже в конце 60-х гг. они назывались по-разному. В нашей стране мы называли их «застывшими звездами» (или «замороженными звездами»). На Западе использовали название «сколлапсировавшие» звезды. Название «черные дыры» было придумано знаменитым американским физиком Джоном Уилером в 1967 г. Оно быстро стало общепринятым.

Прошло еще полвека, и темная энергия была открыта астрофизиками по ее гравитационному влиянию на движение галактик в больших масштабах. Совокупное влияние на движение гравитации положительной плотности энергии вакуума и гравитации отрицательного давления вакуума ведет к ускоренному расширению Вселенной.

Двумерный аналог «кротовой норы». Туннель, лежащий вне нашей Вселенной, соединяет два удаленных места в пространстве нашей Вселенной





*Винтовой электрический ток удерживает
однородное магнитное поле в нашей
Вселенной*

Это явление и было открыто на рубеже нашего тысячелетия. Так подтвердилось еще одно удивительное предсказание ОТО, долгое время казавшееся невозможным. Список можно продолжать.

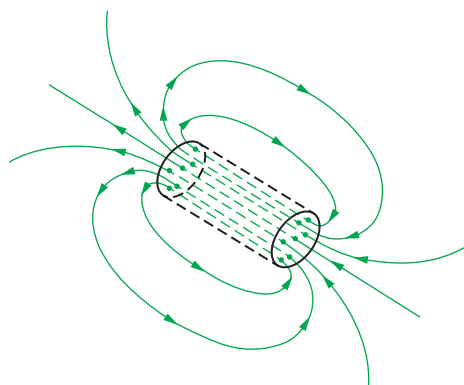
Здесь я расскажу еще об одном более чем необычном предсказании ОТО, судьба которого отличается от описанного выше. Речь идет о кротовых норах (КН). Они были предсказаны в 1916 г. (в рамках ОТО) австрийским физиком Людвигом Фламмом и связаны с сильнейшим искривлением трехмерного пространства. Такой объект представляет собой скрученное в туннель трехмерное пространство, соединяющее удаленные области нашей Вселенной. Выходами из туннеля являются трехмерные отверстия, похожие на черные дыры, но резко отличающиеся от них по своим физическим свойствам. В черную дыру материя может падать, но вылететь из нее невозможно. Входы в кротовую нору проходимы в обоих направлениях¹. Можно влететь

в один вход, пролететь сквозь туннель и вылететь из другого на огромном расстоянии от первого входа. Масса входов может быть разной. Она никак не связана с размерами входов. В принципе входы в одном из типов КН могут лежать даже в разных вселенных. В любом случае туннель лежит вне нашего пространства-времени – в суперпространстве.

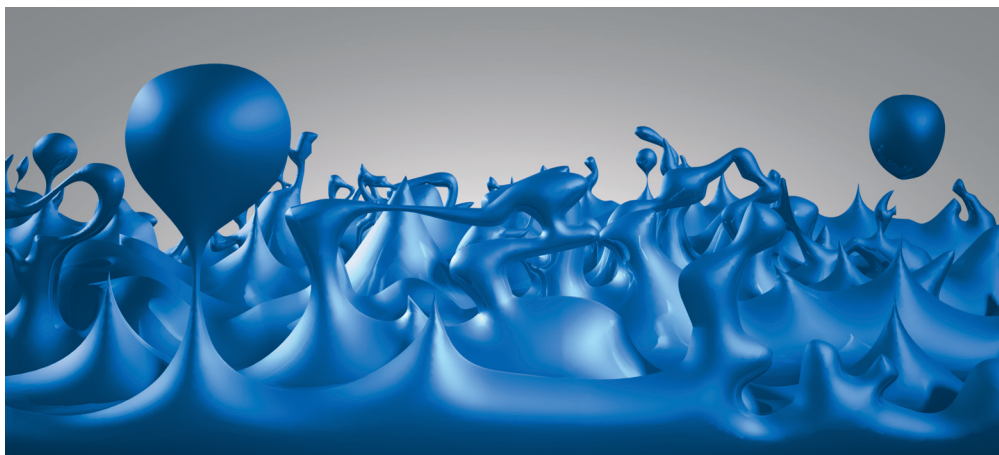
Так же, как и в случае ЧД, эти объекты не сразу получили свое имя. Английский его вариант *wormholes* (червоточина) был придуман тем же Джоном Уилером.

Уилер обратил внимание на КН в середине 50-х гг. прошлого века. Среди прочих удивительных свойств КН он отметил следующее. В обычном пространстве, если мы хотим иметь однородное статическое магнитное поле, то его нужно окружить электрическим током. Ток сдерживает давление магнитных силовых линий. Выключите ток – и поле разлетится в виде электромагнитных волн. В случае КН сквозь нее может проходить статическое магнитное поле без всяких токов. Туннель препятствует разлету. У выходов из КН силовые линии расходятся радиально, как будто это магнитный

*Однородное магнитное поле, проходящее
сквозь туннель кротовой норы*



¹Мы здесь рассматриваем простейшие статические КН, открытые Фламмом. О других типах КН см. УФН, **188**, 301–310 (2018).



«Квантовая пена» пространства-времени в чрезвычайно малых размерах, управляемая законами квантовой гравитации. Иллюстрация: NASA/CXC/M.Weiss

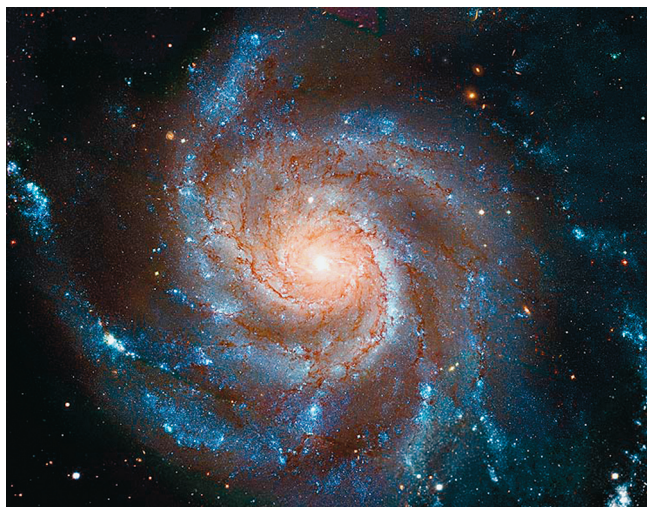
монополь. Вся картина будет статичной. КН, если она заполнена особой экзотической материей, может быть статической.

Как уже говорилось, теоретически КН была предсказана, как и ЧД, и темная энергия – около ста лет назад. Но, в отличие от последних двух объектов, давно открытых в астрофизике, КН до сих пор не открыты! Более того, мы даже не знаем, как они могут образоваться в реальной Вселенной. Одна из возможностей была указана американским физиком Кипом Торном. Он отметил, что, согласно законам квантовой физики, в очень малых масштабах пространство-время не является гладким и непрерывным. По-видимому, его следует рассматривать как «квантовую пену», где существуют самые причудливые связи и искривления, в том числе и микроскопические КН. Торн писал: «Если квантовая пена существует, то есть шанс, что в результате какого-то естественного процесса некоторые из микроскопических КН могут самопроизвольно разрастаться до человеческих или даже больших масштабов» (2015).

Во всяком случае, нет доказательства, что КН не может существовать. А если так, то следует придерживаться шутивого правила в романе Т.Х. Уайта «Король сегодня и навсегда»: «Все, что не запрещено, является принудительно-обязательным».

Найти КН во Вселенной было бы крайне важным. Это не только бы означало прорыв в астрофизике, но и повлияло бы на все наше мировоззрение.

Помня историю ЧД и темной энергии, долгое время бывших в «научном изгнании», а затем триумфально ворвавшимся, будучи открытыми астрофизиками, мы посчитали естественным заняться поисками КН во Вселенной. На рубеже нового тысячелетия академик Н.С. Кардашев предложил гипотезу, согласно которой ядра некоторых галактик являются не массивными ЧД, а входами в КН. Как это проверить? Надо найти наблюдательные проявления КН, которые в корне отличают их от ЧД. И надо организовать наблюдение этих отличий. Было ясно, что для таких наблюдений нужны новые инструменты с чрезвычайно

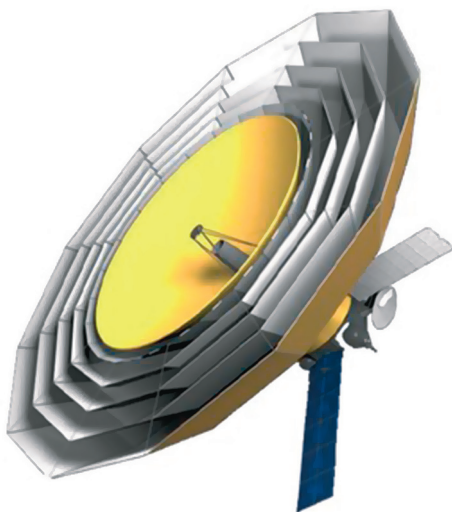


Галактика и ее ядро. Изображение телескопа им. Хаббла

высоким угловым разрешением, позволяющим уверенно исследовать физические процессы вблизи центров галактических ядер, находящихся на больших расстояниях от наблюдателя.

Н.С. Кардашев был инициатором, создателем и руководителем двух проектов космических интерферометров: «Радио-Астрон» и «Миллиметрон», предна-

Зеркало будущего космического интерферометра «Миллиметрон»



значенных для решения целого ряда принципиальных важнейших проблем астрофизики, включая и поиск КН. Первый из этих проектов был успешно осуществлен в 2011–2019 гг. Запуск в космос «Миллиметрона» планируется на конец этого десятилетия. К сожалению, мощность космического интерферометра «Радио-Астрон» позволяла провести только первую разведку в этом направлении.

Проект «Миллиметрон», работа над которым успешно проводилась под руководством Н.С. Кардашева, а после его смерти в 2019 г. продолжается его соратниками, позволит серьезно углубиться в решение проблемы поиска КН.

Какие наблюдательные свойства КН позволят отличить их от ЧД? Мы укажем здесь следующие:

- это радиальное магнитное поле у входа (такого поля у ЧД быть не может)²;
- это возможность истечения материи из КН, что невозможно в случае ЧД;
- это возможность в принципе видеть сквозь туннель другой вход КН, даже если он лежит в другой вселенной.

Как мы подчеркивали выше, открытие КН было бы переворотом во всем нашем мировоззрении.

Мы видим, что открытие во Вселенной ЧД и темной энергии вместе с открытием гравитационных волн при слиянии ЧД и активные поиски КН знаменуют новый этап в развитии ОТО.

² Исторически иногда называют теоретическую модель Рейснера–Нордстрема с радиальным магнитным полем черной дырой. В действительности, это вход в КН специального вида, см. *УФН*, **188**, 301 (2018).

С новыми книгами
Издательства “Наука”
вы можете ознакомиться на сайте
naukabooks.ru



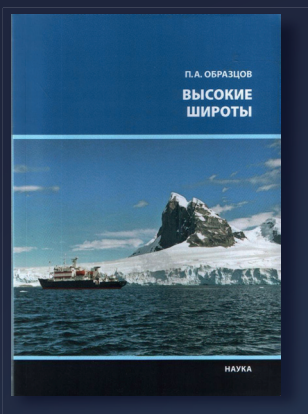
Капанадзе А.Л.

**Опытным путем:
Эксперименты, изменившие мир.**

М.: Наука, 2019. – 319 с.

В книге рассказывается об основных вехах в развитии экспериментальных методов в самых разных областях наук о природе, человеке и обществе – физике, химии, астрономии, биологии, физиологии, медицине, археологии, социологии, психологии, экономике. Охвачен период с античных времен до наших дней. Читатель узнает о знаменитых и малоизвестных опытах, оказавших огромное влияние на формирование наших представлений о мире и о нас самих. Большое внимание автор уделяет не только истории приборов и технологий, но и истории идей. Затрагиваются проблемы отличия классического эксперимента от наблюдения (когда опыт «ставит» сама природа), преемственности технических инноваций, влияния общественного климата на работу экспериментатора, роли случайности в этой работе.

Для широкого круга читателей.



Образцов П.А.

Высокие широты.

М.: Наука, 2018. – 192 с. – (Научно-популярная литература)

Книга повествует об открытии и освоении Арктики и Антарктики, этих двух полюсов холода и мужества, об отважных героях, благодаря которым человечество узнало о природе, животном мире самых северных и самых южных земель, а также о том, какая непростая и вместе с тем увлекательная жизнь идет сегодня в этих суровых, таинственных и манящих краях.

Для широкого круга читателей.



Верещагин Г.В., Аксенов А.Г.

Релятивистская кинетическая теория с приложениями в астрофизике и космологии.

М.: Наука, 2018. — 471 с.

Релятивистская кинетика широко применяется в астрофизике и космологии. В последние годы интерес к этой теории вырос, поскольку появилась возможность ставить эксперименты при таких условиях, где релятивистские эффекты становятся существенными. Настоящая монография состоит из трех частей. В первой части представлены основные идеи и концепции, уравнения и методы теории, включая вывод кинетических уравнений из релятивистской цепочки Боголюбова, а также соотношение кинетического и гидродинамического описаний. Вторая часть — это введение в вычислительную физику, причем особое внимание уделяется численному интегрированию уравнений Больцмана и смежным вопросам, а также многокомпонентной гидродинамике. В третьей части дан обзор приложений, который охватывает вопросы ковариантной теории отклика, термализации плазмы, комптонизации в статических и динамических средах, кинетики самогравитирующих систем, образования структуры в космологии и излучения нейтрино при гравитационном коллапсе.

Для студентов старших курсов университетов, аспирантов и исследователей, специализирующихся в области теоретической физики, астрофизики и космологии.

naukabooks.ru

Реклама

ПО СЛЕДАМ ОЧЕНЬ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

АРЕФЬЕВ Вадим Александрович,

кандидат физико-математических наук
Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394820040039



Мы уже привыкли к тому, что в небе постоянно происходят (и регистрируются) исключительно энергичные события: взрываются сверхновые, вспыхивают гамма-всплески, сталкиваются галактики и даже скопления галактик – самых крупных гравитационно-связанных объектов во Вселенной. Если спросить, в каком же из этих катаклизмов выделяется наибольшее количество энергии, то чаще всего следует ответ, что это гамма-всплески: в наиболее мощных из них выделяется более 10^{54} эрг, что в несколько тысяч раз больше, чем при взрывах сверхновых. Но действительно ли гамма-всплески – самые энергичные события во Вселенной? Оказывается – нет.

Недавно международная группа ученых из США, Австралии и Новой Зеландии открыла следы наиболее энергичного события¹, которое по суммарной выделенной энергии было поставлено

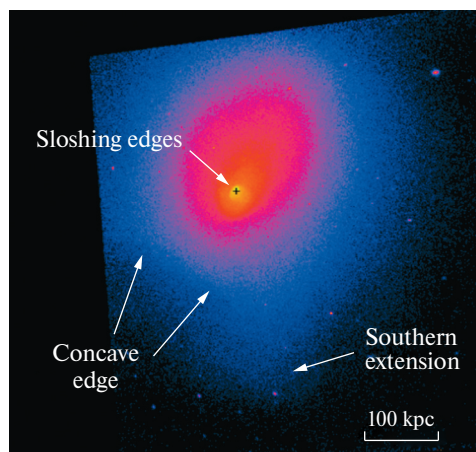
на второе место после... самого Большого Взрыва, создавшего нашу Вселенную.

Первые намеки на то, что такое событие происходило, были получены еще в 2016 г., когда при анализе глубоких наблюдений рентгеновским телескопом *Chandra* скопления галактик в Змееносце, находящегося на красном смещении $z = 0,029$ (около 390 млн св. лет), в рентгеновских изображениях был найден «вогнутый» разрыв плотности межгалактического газа².

Тогда же была выдвинута гипотеза, что это следы гигантской вспышки активного ядра галактики (АЯГ), находящегося в центре скопления, и была приближенно оценена энергетика такого события. Суммарная энергия этой вспышки составила более чем 10^{61} эрг. Такая величина выглядела чудовищно, поэтому ученые с сомнением отнеслись к этому предположению. К тому

¹S. Giacintucci, M. Markevitch, M. Johnston-Hollitt, D. R. Wik, Q. H. S. Wang, and T.E. Clarke Discovery of a Giant Radio Fossil in the Ophiuchus Galaxy Cluster, 2020, *ApJ*, **891**, 1.

²N. Werner et al. Deep *Chandra* study of the truncated cool core of the Ophiuchus cluster *MNRAS*, **460**, Issue 3, 11.



Рентгеновское изображение скопления в Змееносце, по данным телескопа *Chandra*, в диапазоне 0,5–4 кэВ. Черный крест отмечает cD-галактику, в которой, вероятно, находится активное ядро галактики, создавшее гигантский «пузырь», чей край виден в левом нижнем углу изображения как «вознутая линия» (отмечены стрелками). Изображение из статьи S. Giacintucci et al., 2020

же в скоплении не наблюдалось ни активного ядра галактики, ни яркого джета из релятивистских частиц, которые обычно сопровождают подобные вспышки.

Стало понятно, что по одним рентгеновским данным разгадать эту загадку не получится – требовались наблюдения в других областях электромагнитного спектра, которые в конце концов и подтвердили эту гипотезу. Как это было сделано и что нового было обнаружено в скоплении галактик в Змееносце, рассказывается ниже, но вначале – несколько слов о том, что представляют собой скопления галактик.

Как следует из названия, скопления галактик содержат галактики, но не только их – значительную долю их массы составляет горячий разреженный межгалактический газ. По своей массе он может превышать массу видимых галактик скопления в десять и более

раз, и разогрет настолько, что излучает именно в рентгеновском диапазоне.

Однако температура газа так высока, что он бы давно покинул скопление, если бы не наличие еще одной «составной части» – темной материи, чье гравитационное поле и формирует само скопление и удерживает вместе все его компоненты.

Если в скоплении ничего не происходит, то на рентгеновском изображении оно выглядит как сферически симметричное пятно: яркое в центре, где плотность межгалактического газа больше, и более тусклое по краям, где она заметно уменьшается. При этом ближе к центру богатых скоплений могут находиться гигантские эллиптические галактики – так называемые галактики cD-типа.

Если же в скоплении находится активная сверхмассивная черная дыра, она же АЯГ, то в результате ее излучения межгалактический газ рядом с ней нагревается, формируются «пузыри» плотного горячего газа, которые медленно «всплывают» в более разреженную область на краю скопления.

Примером такого «активного» скопления может быть MS0735.6+7421 – скопление галактик в созвездии Жирафа на расстоянии около 2,6 млрд световых лет от Млечного Пути. В изображении этого скопления, полученного по данным телескопов *Hubble* (видимый диапазон), *Chandra* (рентген), VLA (радиодиапазон), видно, что из центральной cD-галактики бьют два радиоджета, которые создают хорошо видимые разрежения в рентгеновском излучении скопления сверху и внизу изображения. При этом предполагается, что в центральной cD-галактике находится одна из крупнейших сверхмассивных черных дыр, чье излучение и создает эти джеты, которые взаимодействуют с межгалактическим газом в центре скопления и формируют разогретые газовые пузыри, диаметром 600 тыс. световых лет каждый.

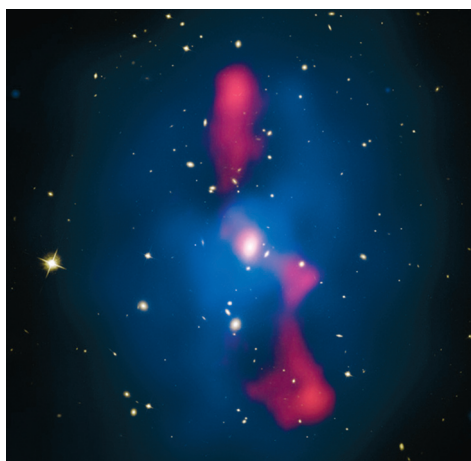
Поэтому у исследователей возникла естественная мысль, что надо проверить излучение скопления в Змееносце в радиодиапазоне, чтобы определить, есть ли в нем характерные особенности (джет и те самые пузыри), которые помогут подтвердить или опровергнуть наличие в прошлом гигантского выброса энергии.

Для этого были проанализированы данные радиообзора GLEAM и наблюдений трех наземных радиотелескопов: австралийского MWA, индийского GMRT и американского VLT, – которые покрыли исключительно широкий диапазон от 74 МГц до 1477 МГц.

И действительно, оказалось, что в радиоизображениях хорошо видны структуры, заполняющие пузырь, чей край виден на рентгеновском изображении, причем границы структур в обоих диапазонах точно совпадают. Радиус этой полости, заполненной релятивистскими электронами, составляет около 230 кпк. Оценки работы, необходимой для создания пузыря такого объема в межгалактическом газе, как раз составляют около $5 \cdot 10^{61}$ эрг.

Сколько же времени потребовалось для того, чтобы АЯГ смогло надуть такой пузырь? Часто в синхротронном спектре релятивистских электронов, заполняющих такие полости, можно наблюдать резкое уменьшение потока именно высокоэнергичных фотонов. Оно вызвано тем, что наиболее высокоэнергетические релятивистские электроны остывают первыми, и спектр мощности электронов (и, соответственно, спектр их синхротронного излучения) демонстрирует экспоненциальный спад, который с течением времени переходит к более низким энергиям. Это позволяет определить возраст наблюдаемой структуры.

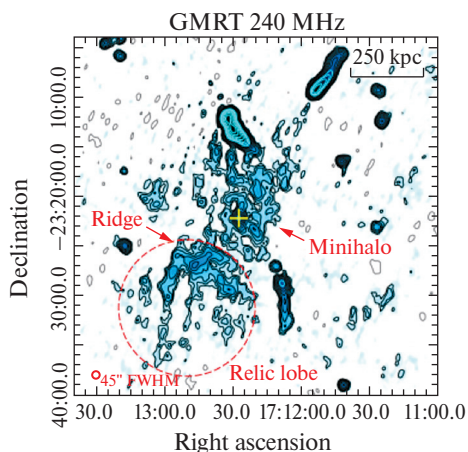
В спектре данного пузыря такого экспоненциального спада не было обнаружено – его можно описать степенным законом с индексом 2.4. Означает ли это, что время надувания этого пу-



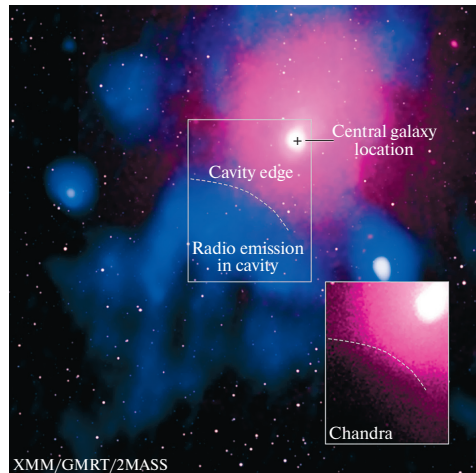
*Композитное изображение скопления MS0735.6+7421 в созвездии Жирафа в видимом (белое), рентгене (синее) и радиодиапазонах (красное). Изображение из архива обсерватории Chandra:
X-ray: NASA/CXC/Univ. Waterloo/B.McNamara;
Optical: NASA/ESA/STScI/Univ. Waterloo/
B.McNamara; Radio: NRAO/Ohio Univ./
L. Birzan et al.*

зыря мало? Ответ: вероятно, нет. Из-за больших размеров образовавшейся полости измеренный спектр является суммой спектров большого числа различных участков, которые могут заметно отличаться друг от друга. Но можно оценить минимальное время существования пузыря. Если полость начала свою жизнь вблизи центра скопления cD-галактики Змееносца, то ей потребовалось бы не менее 240 млн лет, чтобы подняться до текущего положения, двигаясь со скоростью звука – это верхний предел для скорости подъема. Фактический же возраст «полости» больше этого.

Казалось бы, получены ответы на все интересующие вопросы, но как обычно бывает в процессе исследования, вместе с найденными ответами появляются новые вопросы. При внимательном взгляде на композитное изображение скопления в Змееносце не наблюдается никаких следов джета ни в рентгеновском,



Радиоизображение, полученное телескопом GMRT на частоте 240 МГц с угловым разрешением 45 угл. сек. Красной штриховкой обозначен круг с границей, совпадающей с границей впадины на рентгеновском изображении скопления. Радиус круга 230 кпк. Желтым крестом обозначена cD-галактика. Изображение из статьи S. Giacintucci et al., 2020



Композитное изображение скопления в Змееносце в инфракрасном (белый цвет), рентгеновском (фиолетовый цвет) и радиодиапазонах (синий цвет). Изображение: X-ray: Chandra: NASA/CXC/NRL/S. Giacintucci, et al., XMM-Newton: ESA/XMM-Newton; Radio: NCRA/TIFR/GMRT; Infrared: 2MASS/UMass/IPAC-Caltech/NASA/NSF

ни в радиодиапазонах (сравните с изображением скопления в созвездии Жирафа на стр. 29). Также не видно второго «реликтового пузыря», который должен наблюдаться с противоположной стороны относительно центральной cD-галактики скопления.

В настоящее время центральное АЯГ – слабый источник радиоизлучения, так что в прошлом оно должно было быть намного мощнее, чтобы произвести полость такого размера. Можно предположить, что уже длительное время аккреция на сверхмассивную черную дыру мала (поэтому нет и джета), поскольку пик плотности межгалактического газа смещен по отношению к ядру скопления (там, где находится cD-галактика), вероятно, из-за воздействия излучения этого АЯГ во время гигантской вспышки. Отсутствие же второго реликтового пузыря, возможно, связано с тем, что градиенты плотности газа в скоплении в том месте, где должен был бы находиться второй реликтовый пузырь – круче, и следов от второго пузыря к настоящему времени не осталось.

Чтобы проверить эти предположения, требуются гораздо более чувствительные наблюдения в радио- и рентгеновском диапазонах. Одним из таких аппаратов, которые могли бы дать новую информацию, является российская космическая обсерватория «Спектр-РГ». В настоящее время она проводит обзор всего неба в рентгеновском диапазоне, который станет рекордным по чувствительности среди всех предшествовавших ему, а по его окончании приступит к глубоким наблюдениям наиболее интересных источников. Много времени будет посвящено именно наблюдению скоплений галактик. Мы надеемся, что большое поле зрения, высокая чувствительность, хорошее угловое и энергетическое разрешение телескопов «Спектр-РГ» позволят получить ответы и на те загадки, которые продолжает загадывать скопление в Змееносце.

Михаил Николаевич ПАВЛИНСКИЙ (08.12.1959–01.07.2020)

1 июля 2020 года, после тяжелой болезни, скончался заместитель научного руководителя проекта «Спектр-РГ», создатель и научный руководитель российского рентгеновского телескопа ART-XC **Михаил Николаевич Павлинский**.

Михаил Николаевич родился 8 декабря 1959 г. в городе Саров Нижегородской области. В 1983 г. после окончания Московского инженерно-физического института он пришел работать в Институт космических исследований АН СССР. С ИКИ связана вся его трудовая деятельность, в которой он прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего одного из ведущих отделов и заместителя директора.

М.Н. Павлинский был уникальным человеком. Он создал телескоп ART-П на спутнике «Гранат» – первый полноценный отечественный рентгеновский космический инструмент. Он ввел в работу один из самых эффективных отечественных оптических телескопов – Российско-Турецкий РТТ-150. Став руководителем отдела, своей кипучей энергией он смог «заразить» коллег и создать уникальный коллектив ученых и инженеров. Михаил Николаевич все время торопился, подгонял себя и нас, был жаден до работы. Интересовался и вникал во все, что он делал, от начала до конца. Был полон идей и планов.

У Михаила Николаевича было упорство и дух победителя: в последнее время начала 2000-х, когда проект «Спектр-РГ» оказался на грани закрытия, он поднял его из руин и привел к запуску в 2019 г. и последующим триумфальным результатам. В этот проект Михаил Николаевич вложил все свои силы без остатка. Только благодаря его настойчивости, бескомпромиссности, знаниям и опыту проект состоялся и дает бесценные научные данные. После этого на сохранение собствен-



ного здоровья сил у Михаила Николаевича уже не осталось.

Его детище – первый в России зеркальный рентгеновский телескоп ART-XC – прямо сейчас продолжает обзор неба и собирает как мозаику самую чувствительную карту всего неба в жестком рентгеновском диапазоне, которая уже вошла в историю рентгеновской астрономии.

М.Н. Павлинский был Руководителем с большой буквы. Никогда не раздавал приказы. Только убеждение и собственный пример. Спорил. Доказывал. Такой стиль работ позволил ему собрать вокруг себя команду единомышленников, доказавшую свою эффективность реальными делами. При этом он был оптимистичным и жизнерадостным человеком. Свой оптимизм он подкреплял огромной жизненной энергией и с ее помощью принимался решать проблемы, которых на его долю выпадало немало. Он всегда общался с юмором и легкостью и со студентом, и с ведущим ученым, независимо от сложностей стоящих задач, ни на минуту не останавливаясь, постоянно пребывая в поиске новых задач, провоцируя и подталкивая окружающих к деятельности, при этом всегда защищая и поддерживая своих коллег.

Неуемная энергия Михаила Николаевича не давала ему успокоиться даже после того, как он узнал о своей болезни. До самого последнего момента он не только продолжал руководить отделом и целым рядом проектов, но и выполнял ведущую роль по обработке и интерпретации полученных результатов. До последнего дня своей жизни он прорабатывал идеи новых проектов, думал о новых научных задачах.

Сегодня мы, соратники, коллеги, друзья, скорбим по поводу его кончины. Нет слов, которыми мы могли бы выразить боль от этой утраты.

В ЛУЧАХ ЗВЕЗДЫ ПО ИМЕНИ СОЛНЦЕ Институту солнечно-земной физики СО РАН – 60 лет



МЕДВЕДЕВ Андрей Всеволодович,
член-корреспондент РАН

ЯЗЕВ Сергей Артурович,
доктор физико-математических наук
Институт солнечно-земной физики СО РАН



DOI: 10.7868/50044394820040040

60 лет тому назад, в 1960 г. в г. Иркутске был основан Сибирский институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн (СибИЗМИР) Сибирского Отделения АН СССР. Он стал крупнейшим научным центром в области физики околоземного космического пространства в восточной части страны, создав уникальный комплекс исследовательских установок. В 1986 г. Институт был награжден орденом Трудового Красного Знамени. В 1993 г. СибИЗМИР был переименован в Институт солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН. В настоящее время идут работы по созданию на базе института Национального гелиогеофизического комплекса РАН, который оснащается уникальными инструментами нового поколения.

НА ПУТИ К СОЗДАНИЮ ИНСТИТУТА

1 ноября 1886 г. в г. Иркутске начала работу магнитно-метеорологическая обсерватория – одно из первых науч-

ных учреждений в Сибири. Ее возглавил Э.В. Штеллинг; после его перевода в Тифлис, а затем в Санкт-Петербург, с 1895 г. – обсерваторией руководил А.В. Вознесенский. Впервые в Сибири в 1907 г. он выполнил цикл аэрологических наблюдений с борта аэростата.

В 1908 г. обсерватория зафиксировала уникальное явление – магнитный след падения Тунгусского космического тела. В эти годы обсерватория стала полноценным научным учреждением, здесь велись профессиональные наблюдения и публиковались научные труды, в т.ч. о солнечно-земных связях. В 1914 г. из-за роста помех в городе магнитные и аэрологические наблюдения были перенесены в поселок Зуй, расположенный в 30 км к северо-западу от г. Иркутска.

Работа станции была продолжена и при советской власти. В 1931 г. начался ряд преобразований: обсерватория стала Научно-исследовательским геофизическим институтом, в 1933 г. – Иркутской геофизической обсерваторией. Здесь были начаты исследования «векового хода» геомагнитного поля.

Во время войны, в 1942 г. развернулись исследования атмосферных электрических разрядов и теллурических (земных) токов.

В 1948 г. в г. Иркутске заработала ионосферная станция под руководством будущего руководителя иркутской радиофизической школы, профессора Иркутского государственного университета В.М. Полякова. В 1956 г. Иркутская геофизическая обсерватория была реорганизована в гидрометеорологическую обсерваторию. На базе ее магнитного отдела была сформирована Комплексная магнитно-ионосферная станция (Иркутская КМИС). В 1957–1958 гг. из-за нарастающих помех, вследствие электрификации Транссибирской магистрали (станция Зуй находилась возле железной дороги), магнитные измерения были перенесены отсюда



Здание магнитно-метеорологической обсерватории, г. Иркутск



Один из основателей Института,
доктор технических наук Г.Я. Смольков



60 лет назад. Так начинался СибИЗМИР
СО АН СССР

в поселок Патроны, где до сих ведутся непрерывные измерения геомагнитного поля.

Приближался грандиозный проект «Международный геофизический год» 1957–1958 гг. (МГГ; ЗиВ, 2007, № 4), в котором принял участие СССР. Страна серьезно подошла к научной программе МГГ. В 1956 г. было принято решение о расширении программы работ иркутских геофизиков за счет оптических и радиоастрономических наблюдений Солнца. На станцию в Зуе из Ленинграда был доставлен солнечный фотосферно-хромосферный телескоп «АФР-2». Возглавил новый отдел выпускник ИГУ Г.Я. Смольков, под руководством которого заработал первый радиотелескоп в Сибири, созданный на базе американского военного радара.

НОВЫЙ ИНСТИТУТ В ИРКУТСКЕ

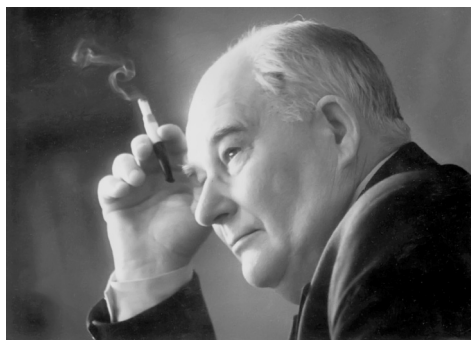
Постепенно в Иркутске накапливался научно-инструментальный потенциал, а в университете готовились квалифицированные научные кадры, получая опыт в процессе работы на геофизических станциях. 27 мая 1960 г. было подписано решение о создании на базе Иркутской КМИС Сибирского института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн – СибИЗМИР СО АН СССР. Первым исполняющим обязанности директора был назначен выпускник физико-математического факультета ИГУ В.Д. Кокоуров. Тогда же были определены основные научные направления нового института. В их число вошли изучение земного магнетизма и ионосферы Земли (включая распространение радиоволн в ионосфере), а также исследования феномена солнечной активности и связанных с ней явлений в околоземном космосе и земных оболочках.

Помимо фундаментальных исследований, планировались прикладные работы – деятельность Службы Солнца, в том числе в интересах обеспечения радиационной безопасности пилотируемых космических полетов, контроль состояния ионосферы и геомагнитного поля, регистрация космических лучей. Институт должен был передавать данные своих наблюдений в прогностические геофизические центры страны, обмениваться данными с зарубежными обсерваториями.

ОБСЕРВАТОРИИ И УСТАНОВКИ

В 1961 г. директором был назначен член-корреспондент АН Туркменской ССР Н.М. Ерофеев. Институт быстро развивался, и первоочередной задачей для него стало создание целого ряда собственных обсерваторий и полигонов, расположенных в Восточной Сибири.

В 1966 г. была сооружена Саянская солнечная обсерватория в 300 км к западу от Иркутска, в конце Тункинской долины на территории Бурятии, вблизи советско-монгольской границы. Она располагалась в горах на высоте 2000 метров над уровнем моря, по итогам цикла астроклиматических исследований, выполненных под руководством доктора физико-математических наук Ш.П. Дарчия, было выбрано место для строительства. Будущие ученые сами строили свои установки. Так, в деревянном павильоне был собран горизонтальный солнечный телескоп АЦУ-5, установлен сначала малый солнечный коронограф, а вслед за ним и большой коронограф с диаметром объектива 535 мм. Именно наличие «коронального» неба (низкого уровня рассеянного света) в Саянских горах оказалось решающим доводом для переезда в Иркутск из Крымской астрофизической



Член-корреспондент АН СССР В.Е. Степанов

обсерватории выдающегося советского гелиофизика, специалиста по солнечному магнетизму, будущего члена-корреспондента АН СССР В.Е. Степанова. В 1964 г. он на 15 лет возглавил институт, а также его «солнечное» направление. Под руководством В.Е. Степанова велось сооружение новых телескопов и обсерваторий, были начаты комплексные наблюдения и исследования Солнца.

В Саянской обсерватории было возведено здание большого горизонтального солнечного телескопа. Два зеркала целостатной установки (вспомогательная система из двух поворотных плоских зеркал перед неподвижным объективом) направляют изображения Солнца на сферическое зеркало диаметром 800 мм с фокусным расстоянием 20 м. Телескоп оснащен спектрографом и магнитографом. На этом инструменте выполнены сотни работ, посвященных исследованию магнитных полей солнечных образований, их лучевых скоростей и колебаний. Исследования Солнца ведутся под научным руководством члена-корреспондента РАН В.М. Григорьева и заведующего отделом физики Солнца, доктора физико-математических наук М.Л. Демидова.

В Саянской солнечной обсерватории, помимо солнечных инструментов,



*Здание автоматизированного солнечного телескопа. Саянская обсерватория ИСЗФ СО РАН.
Фото Е.В. Козырева*

были установлены звездные телескопы – «АЗТ-14А» и «Цейсс-600». Эти уже старые инструменты, на которых неоднократно обновлялись средства регистрации (от фотопластинок до телевизионной установки и цифровых камер), успешно работают и сегодня, регистрируя искусственные объекты (космические аппараты и мусор) на околоземных орбитах.

Уже в XXI веке в Саянской обсерватории появились два крупных звездных телескопа, изготовленных в Санкт-Петербурге (Ленинградское оптико-механическое объединение, ныне АО «ЛОМО»). В 2006 г. был установлен рефлектор АЗТ-33ИК с диаметром главного зеркала 170 см, оснащенный матрицей, работающей в ИК-диапазоне. На нем в настоящее время ведутся наблюдения в соответствии с научной программой ИКИ РАН – опреде-

ляются значения красного смещения (индикатор расширения Вселенной) далеких галактик. Эти данные могут быть использованы для обеспечения работы российско-немецкой космической астрофизической обсерватории «Спектр-РГ», успешно работающей на орбите с 21 октября 2019 г. Ведутся наблюдения и по другим программам, включая запросы Центра управления полетами отечественных космических аппаратов.

Второй крупный телескоп – АЗТ-33ВМ (2016 г.) оснащен главным зеркалом диаметром 160 см. Специальная оптическая схема обеспечивает большое поле зрения (2,8 градуса). Это позволяет проводить эффективные массивные наблюдения слабых оптических источников, включая объекты Главного пояса астероидов, а также астероиды, угрожающие Земле.



Панорама Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН. Слева – башня АЗТ-33ИК, справа – башня АЗТ-33ВМ. Фото Е.В. Козырева

На высоком берегу озера Байкала в 70 км от Иркутска размещена еще одна обсерватория института – Байкальская астрофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН. Здесь под руководством В.Е. Степанова и доктора физико-математических наук В.Г. Банина был сооружен Большой вакуумный солнечный телескоп (БСВТ). Отражение Солнца от плоского метрового зеркала сидеростатной установки отправляется на 760-мм объектив, который формирует изображения в нижней части 40-метровой наклонной трубы телескопа, нацеленной на северный полюс мира. Объектив был изготовлен группой оптиков института под руководством доктора физико-математических наук В.И. Скоморовского. Теоретическое пространственное разрешение телескопа составляет 0,2 угловых секунды, реальное разре-

шение – около 0,4 угловых секунды. БСВТ оснащен высокодисперсионным спектрографом, оптическая схема которого, разработанная доктором физико-математических наук Н.М. Фирстовой, представляет схему Эберта-Фасти с фокусным расстоянием 15 м. С помощью спектрографа можно определять физические параметры солнечной плазмы: скорость движения вещества, химический состав, магнитное поле, а также оценивать температуру, скорость микротурбулентных движений и электронную концентрацию солнечной плазмы. Основным элементом спектрографа является дифракционная решетка размером 200×300 мм, имеющая 600 штрихов/мм. Спектральное разрешение спектрографа для пятого порядка составляет 0,0007 нм. Здесь выполнены уникальные наблюдения ряда солнечных вспышек.



Большой солнечный вакуумный телескоп. Байкальская астрофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН. Фото Е.В. Козырева



Северный луч Сибирского солнечного радиотелескопа. Фото С.А. Язева

В урочище Бадары Тункинской долины (Бурятия), расположенном в 220 км от г. Иркутска, в 1972 г. было развернуто строительство Радиоастрофизической обсерватории института и ее главного инструмента – Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ). Этот уникальный крестообразный радиоинтерферометр состоит из двух ортогональных 128-элементных антенных решеток длиной 622,3 м каждая. Элементы решеток представляют собой 2,5-метровые антенны (тарелки). Сооружение ССРТ велось под общим руководством доктора технических наук Г.Я. Смолькова. Уникальный всепогодный радиотелескоп позволяет получать двумерные радиоизображения Солнца в сантиметровом диапазоне. В 1996 г. большой коллектив специалистов, создававший этот инструмент, был удостоен премии правительства РФ в области науки и техники.

В период событий 1990-х гг., после развала СССР, находившийся вблизи г. Усолье-Сибирское в 125 км от Иркутска военный радар системы «Днепр» был готов к списанию и утилизации. В институте (к тому времени он уже именовался Институтом солнечно-земной физики СО РАН) было принято непростое решение – взять гигантский дорогостоящий инструмент на баланс института. Ответственность тогда принял на себя тогдашний директор, академик РАН, ныне научный руководитель института Г.А. Жеребцов. Военная установка превратилась в научный прибор – радар некогерентного рассеяния для исследований ионосферы, который и сегодня успешно работает в обсерватории радиофизической диагностики атмосферы ИСЗФ СО РАН. Радар представляет собой рупорную антенну с апертурой $12,2 \times 246$ м. С его помощью определяются скорости дрейфа, ионный состав, электронная и ионная температура, электрон-



*Научный руководитель ИСЗФ СО РАН,
академик РАН Г.А. Жеребцов*

ная концентрация в верхних слоях атмосферы в диапазоне высот от 100 до 1000 км. Большой вклад в становление этой установки и развитие исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния внес директор института в 2010–2016 гг. член-корреспондент РАН А.П. Потехин.

Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН расположена в 150 км от г. Иркутска, вблизи поселка Торы в Тункинской долине, на территории Бурятии. Здесь расположено антенное поле для приема сигналов ионозондов – радиотехнических устройств, служащих для определения действующих высот отражения радиоволн от ионосферы и высотного распределения электронной концентрации. Кроме того, на обсерватории установлены приемники сигналов трансionoсферного зондирования (метод диагностики неоднородностей в ионосфере). Эти ионозонды, разработанные в ИСЗФ СО РАН, имеют уникальные характеристики и позволяют



Геофизическая обсерватория ИСЗФ СО РАН вблизи реки Иркут. Фото Е.В. Козырева

изучать структуру ионосферы с высочайшим пространственным и временным разрешением. Ионозонды позволяют восстанавливать тонкую структуру высотного профиля электронной концентрации, фиксируют скорости и направление перемещений неоднородностей в ионосфере. Использование сигналов с линейной частотной модуляцией позволяет таким ионозондам проводить измерения на сверхмалой мощности, не создавая помех другим измерительным радиосредствам, при этом ионозонды обладают возможностью приема сигналов других источников радиоизлучения с линейной частотной модуляцией на наклонных трассах распространения радиоволн. Научная школа распространения радиоволн КВ-диапазона создавалась в Институте доктором физико-математических наук И. И. Орловым.

Пионерские работы по трансионосферному зондированию и методам исследования ионосферы с помощью гло-

бальных спутниковых навигационных систем были осуществлены в институте под руководством доктора физико-математических наук Э.Л. Афраймовича.

Кроме радиофизических исследований, в обсерватории в Торах ведутся оптические (включая спектральные) наблюдения свечения ночного неба, измеряется солнечная ультрафиолетовая радиация.

Комплексная магнитно-ионосферная обсерватория ИСЗФ СО РАН включает в себя две обсерватории – Байкальскую магнитотеллурическую в поселке Узур на севере острова Ольхон (озеро Байкал), и магнитную на берегу Иркутского водохранилища, в пос. Патроны. На Байкале измеряется вертикальная компонента электромагнитного поля планеты на частотах до 300 Гц. С 1958 г. в пос. Патроны ведутся непрерывные наблюдения геомагнитного поля, начатые еще в г. Иркутске в 1887 г. и продолженные в г. Зуе в 1914 г.

Высокоширотные наблюдения магнитного поля Земли и полярной ионосферы чрезвычайно важны для понимания процессов, происходящих в магнитосфере и ионосфере Земли. Такие исследования проводятся институтом в Норильской комплексной магнитно-ионосферной обсерватории. Помимо ионосферной и магнитно-вариационной станций, здесь работает нейтронный монитор, регистрирующий частицы высоких энергий (космические лучи), приходящие из глубин космического пространства.

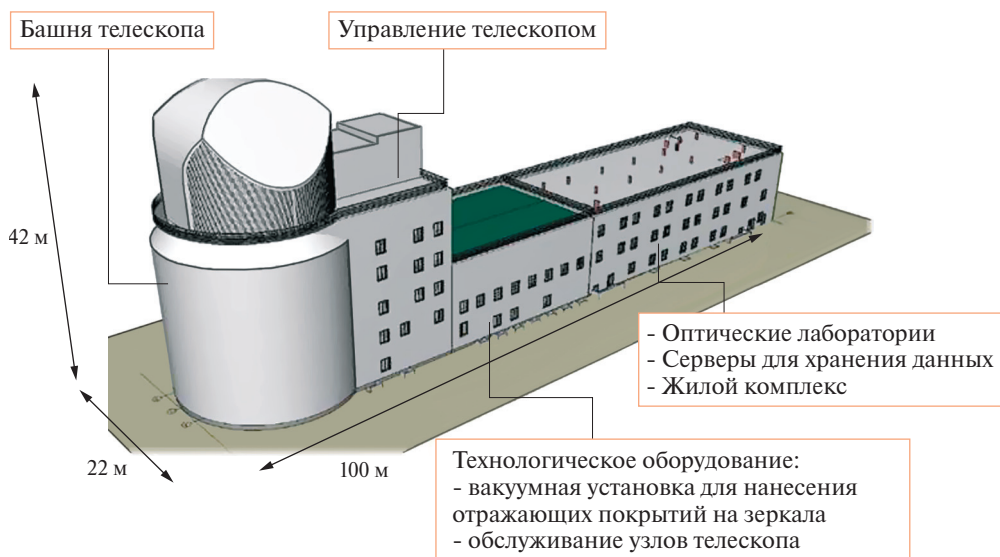
За 60 лет своего существования в ИСЗФ СО РАН и его обсерваториях работали тысячи специалистов, выполнено множество научных исследований в области гелиофизики и геофизики. Разумеется, невозможно перечислить всех сотрудников института, от докторов наук до лаборантов и техников на обсерваториях. Все они, кто больше, кто меньше, внесли свой вклад в историю института.

ПРОЕКТ НАЦИОНАЛЬНОГО ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РАН

В настоящее время в институте реализуется крупный проект общенационального и международного значения. Планируется, что обсерватории ИСЗФ СО РАН будут оснащены установками нового поколения, которые могли бы вывести отечественную солнечно-земную физику на новый уровень. Институт станет основой Национального гелиогеофизического комплекса (НГК) РАН.

В Саянской обсерватории планируется сооружение нового крупного солнечного телескопа-коронографа КСТ-3. Диаметр главного зеркала, оснащенного активной оправой, составит 3 м. Высота здания башни телескопа будет достигать 42 м. С северной стороны к башне будет примыкать корпус, где разместится технологическое оборудование, включая вакуумную уста-

Проект большого солнечного коронографа КСТ-3 Саянской обсерватории





Проект многочастотного радиогелиографа ИСЗФ СО РАН

новку для напыления отражающих покрытий зеркал оптической системы, серверы для хранения и обработки данных, а также жилые помещения для приезжающих наблюдателей. Ввод инструмента в строй планируется в 2026 г.

На базе Сибирского солнечного радиотелескопа создается новый инструмент – многочастотный радиогелиограф. В его состав войдет новое антенное поле, которые будет включать в себя три Т-образные решетки с длиной луча до 1000 м. Каждая решетка будет состоять из 96 трехметровых антенн, работающих на частотах 3–6 ГГц, 224 метровых антенн (8–224 ГГц) и 192 антенн диаметром 1,8 м (6–12 ГГц). Угловое разрешение инструмента достигнет 5 угловых секунд, временное разрешение – 0,01 с. Работы по сооружению новой установки и соответствующей инфраструктуры обсерватории должны завершиться в течение ближайшего года.

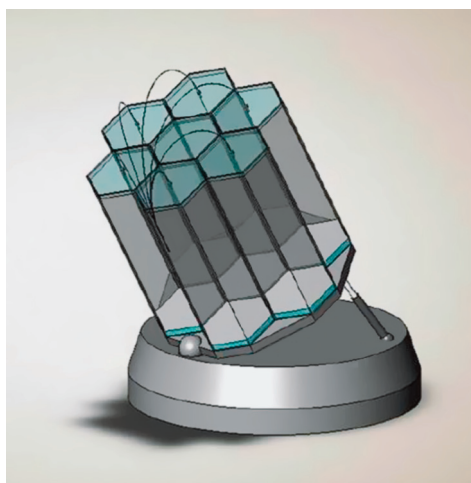
Вблизи озера Байкал, в 250 км от Иркутска, планируется разместить современный мезосферно-стратосферный лидар. Ожидается, что исследование взаимодействия лазерного излу-

чения с атмосферой позволит определять плотность среды, температуру, скорость и направления ветра на разных высотах, а также присутствие аэрозолей на высотах до 100–120 км. В числе определяемых характеристик атмосферы – параметры озонового слоя в стратосфере, а также оптические свойства слоя натрия в мезосфере. Лидар должен войти в строй в 2023 г.

В рамках проекта предполагается, что будет создана пространственно распределенная система когерентных высокочастотных радаров. Задачей этих установок будет являться контроль системы магнитосферно-ионосферных связей в высокоширотных регионах России. Многофункциональный мезосферно-стратосферно-тропосферный радар некогерентного рассеяния (НР-МСТ радар) будет размещен вблизи озера Байкал, в 250 км от Иркутска. Основная цель этой части проекта – изучение динамики нейтральной и ионизированной компонент земной атмосферы в диапазоне высот от 10 до 2000 км с высоким пространственным и временным разрешением. Планируется определять высотный профиль элек-

тронной концентрации, температуру электронов и ионов, химический состав верхних слоев атмосферы, скорости дрейфа плазмы в ионосфере. Исследования высотно-временной структуры волновых возмущений с помощью НР-МСТ радара позволят установить картину взаимодействия нижних слоев атмосферы с ионосферой, восстановить поле нейтрального ветра во всей толще исследуемых высот.

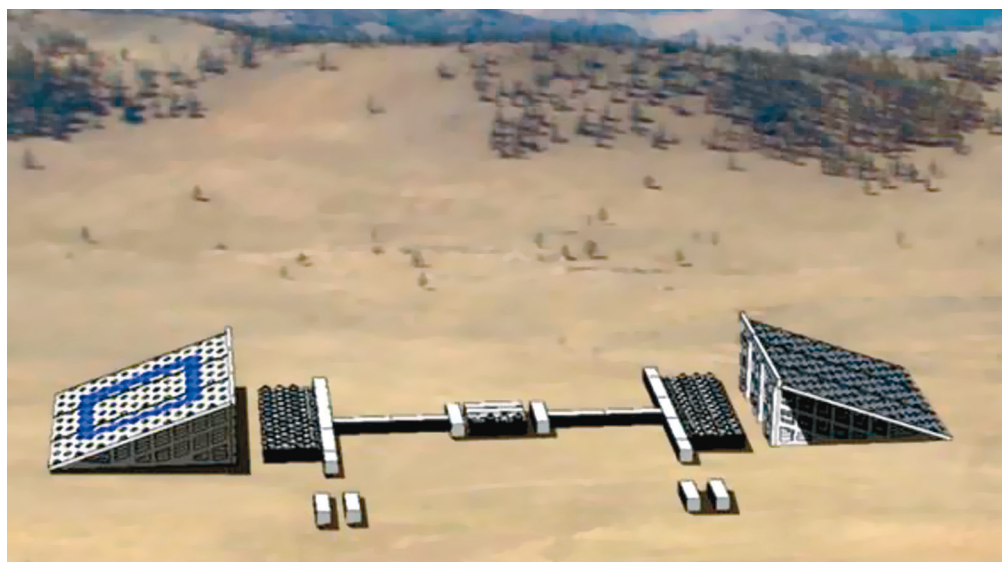
Важная часть исследований, планируемых на этой установке – изучение результатов активного воздействия на ионосферу с помощью мощного коротковолнового излучения. Кроме того, радар сможет осуществлять контроль околоземного космического пространства, выполнять радионаблюдения низкоорбитальных космических аппаратов и объектов космического мусора. Установка будет применяться и для изучения особенностей циркуляции воздушных масс над котловиной озера Байкал и его окрестностями, а также для экологического мониторинга атмосферы в Восточной Сибири.



Проект мезосферно-стратосферного лидара ИСЗФ СО РАН ИСЗФ СО РАН

Нагревной стенд, который разместится в 65 км к северу от г. Иркутска, будет осуществлять воздействие на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением. Он позволит создавать практически лабораторные условия контролируемого воздействия на ионосферную

Проект системы когерентных высокочастотных радаров вблизи озера Байкал



плазму для изучения всего спектра нелинейных явлений в этой среде. Область воздействия на ионосферу будет покрываться самой современной и всеобъемлющей системой диагностики, включающей упомянутые выше систему радаров, лидар и комплекс современных оптических инструментов.

Геофизическая обсерватория в Тункинской долине в настоящее время оснащается новым комплексом оптических инструментов, которые позволяют вести мониторинг параметров атмосферы, включая ее верхние слои – мезосферу и термосферу. В комплекс входят: интерферометр Фабри–Перо, широкоугольная камера для наблюдений свечения ночного неба в различных спектральных диапазонах, комплект спектрографов для измерения вариаций интенсивности различных спектральных линий, чувствительные фотометры. Ввод нового оборудования и нового корпуса обсерватории в эксплуатацию ожидается в течение ближайшего года.

Помимо того, в Иркутске предстоит построить новый корпус для Центра управления Национального гелиогеофизического комплекса (НГК) РАН. Центр будет координировать наблюдения на разных установках комплекса, а также хранить и обрабатывать поступающие данные. В 2023 г. он должен быть введен в эксплуатацию. Стоимость проекта составляет 25 млрд рублей. В настоящее время развернуты работы по проектированию и изготовлению новых научных инструментов. Научным руководителем работ назначен академик Г. А. Жеребцов, во многом, по инициативе которого план создания НГК РАН на наших глазах становится реальным.

Коллектив ИСЗФ СО РАН встречает свое шестидесятилетие напряженным трудом. Начинается новый, чрезвычайно интересный и ответственный этап развития института. Новые установки Восточной Сибири обещают передовые и важные результаты в области солнечно-земной физики.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
НАУКА
1727**
naukapublishers.ru

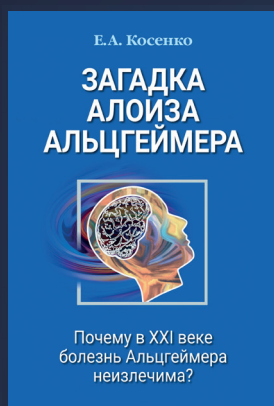
ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ПЕРЕПЛЕТ

Рисунок на коже
Все виды тиснения
Кожанный переплет
Рельефное тиснение
Клише любой сложности
Полноцветная роспись обрешоток
А также адресные папки, дипломы, футляры

Берёмся за работы любой сложности!
По всем интересующим вопросам пишите на почту kiseleva@tnauka.ru

реклама

С новыми книгами
Издательства “Наука”
вы можете ознакомиться на сайте
naukabooks.ru



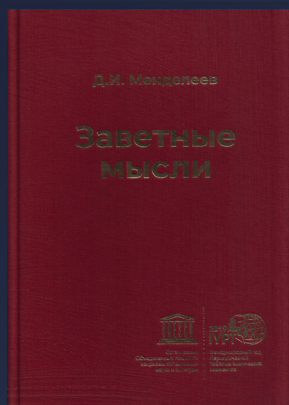
Косенко Е.А.

Загадка Алоиза Альцгеймера. Почему в XXI в. болезнь Альцгеймера неизлечима?

М.: Наука, 2019. — 319 с.

В монографии изложена актуальнейшая на сегодняшний день медико-биологическая проблема, связанная с болезнью Альцгеймера (БА), и предпринята попытка ответить на вопрос: почему заболевание, известное с начала XX в. и на изучение которого тратятся триллионы долларов, в настоящее время все еще остается неизлечимым, а имеющиеся антиамилоидные препараты приносят больше вреда, чем пользы? Для объяснения механизмов, лежащих в основе нейродегенерации при БА, формулируется «эритроцитарная гипотеза», согласно которой эритроциты рассматриваются не просто как клетки, переносящие кислород, а как клетки, от эндогенного метаболизма которых зависит адекватная доставка кислорода в ткани, и в частности в мозг. Именно функциональное несоответствие между эритроцитами и биоэнергетикой мозга, считает автор, лежит в основе гибели нейронов.

Книга может быть интересна широкому кругу читателей – студентам, обучающимся по специальностям «биология», «биомедицина», а также физиологам, биохимикам научно-исследовательских лабораторий, преподавателям высших образовательных медицинских и биологических учреждений.



Менделеев Д.И.

Заветные мысли.

М.: Наука, 2019. — 310 с.

Д.И. Менделеев в работе «Заветные мысли» рассуждает о желательных, на его взгляд, путях развития России в геополитической, экономической и научной областях. Круг анализируемых ученым вопросов чрезвычайно широк: государственное устройство, образование, народонаселение, внешняя торговля, взаимосвязь между просвещением и национальным богатством, баланс между промышленностью и сельским хозяйством и т.д. По существу, «Заветные мысли» – духовное завещание Д.И. Менделеева потомкам.

Для широкого круга читателей.



Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н.

Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками.

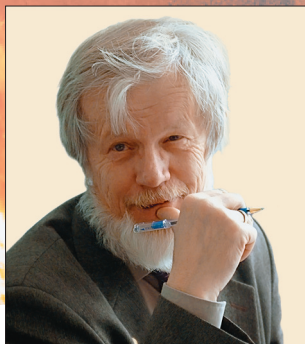
М.: Наука, 2018. — 238 с.

В работе предложен новый взгляд на повышение безопасности АЭС. Разработаны и исследованы многофункциональные системы, включающие такие установки, как дополнительная паровая турбина, тепловые аккумуляторы, водородный комплекс и газотурбинные установки, позволяющие обеспечить надежное электроснабжение собственных нужд АЭС в аварийных ситуациях с обесточиванием. Исследован способ использования остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР для генерации электроэнергии, необходимой для отвода остаточного тепловыделения в аварийных ситуациях с полным обесточиванием. Разработана система уравнений и построены скелетные таблицы свойств диссоциированного водяного пара, которые позволяют проводить промышленные термодинамические расчеты параметров рабочего тела водородных циклов. Исследованы процессы сжигания водорода в кислородной среде, а также определены ресурсные показатели основного оборудования водородного энергокомплекса, работающего в циклических режимах.

Для научных работников, специалистов, аспирантов, студентов старших курсов теплоэнергетических специальностей.

naukabooks.ru

ПЕРЕМЕННАЯ ЗВЕЗДА СОЛНЦЕ И ЕГО МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



ГРИГОРЬЕВ Виктор Михайлович,
член-корреспондент РАН

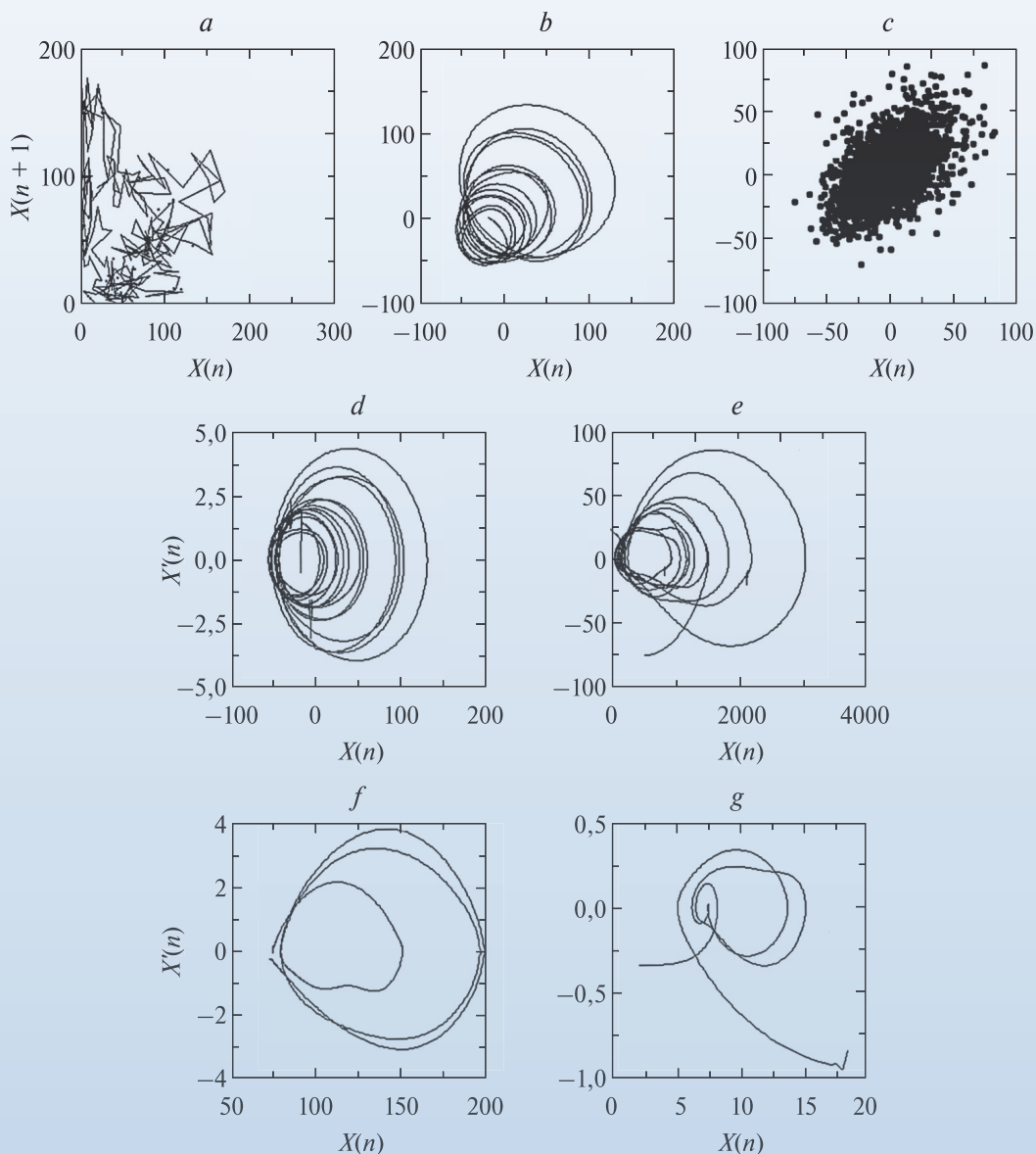
ГОЛОВКО Алексей Алексеевич,
кандидат физико-математических наук
Институт солнечно-земной физики СО РАН



DOI: 10.7868/50044394820040052

В Институте солнечно-земной физики СО РАН, отмечающем в этом году 60-летие, работает большой слаженный коллектив специалистов по физике Солнца и солнечно-земных связей. Одним из его научных направлений является изучение главной причины наблюдаемых явлений солнечной активности – магнитных полей. В развитие этого направления вложил много сил член-корреспондент РАН Владимир Евгеньевич Степанов. Приняв эстафету в создании все совершенствующихся солнечных магнитографов, иркутские «солнечники» совместно с опытным производством в советское время изготовили

экземпляры магнитографа полного вектора для шести обсерваторий СССР и дружественных ГДР и Чехословакии, что стимулировало прогресс исследований и научные обмены в данной области. В дальнейшем создание Солнечного Телескопа Оперативных Прогнозов и установка его экземпляров на Саянской и Байкальской обсерваториях ИСЗФ, Горной астрономической станции ГАО в Кисловодске и на Уссурийской солнечной станции – явилось хорошей инициативой для создания новой современной «службы Солнца». О некоторых достигнутых научных результатах коллектива рассказывается в этой статье.



Псевдофазовые портреты глобальных индексов солнечной активности (временной ряд ежедневных чисел Вольфа – $RW(t)$, суммарная площадь групп пятен – $SA(t)$, поток радиоизлучения на волне 10,7 см – $F_{10,7}(t)$ и модуль общего магнитного поля Солнца – $|SMMF(t)|$): а – временного ряда RW ; б – квазирегулярной составляющей RW ; в – нерегулярной составляющей RW . Фазовые портреты временных рядов: г – RW ; д – SA ; е – $F_{10,7}$; ж – $|SMMF|$. На графиках обозначено: x_n – координата точки в фазовой плоскости (x, x') (точка – значение того или иного глобального индекса солнечной активности в какой-то момент времени), x' – скорость перемещения точки

СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ

Солнце является переменной звездой, и природа ее переменности представляет собой основную проблему солнечной физики в ее фундаментальном значении для астрофизики и прикладном – для прогноза и предупреждения об опасных явлениях в околоземном космическом пространстве и в атмосфере Земли. Переменность Солнца характеризуют глобальные параметры Солнца как звезды: светимость, число солнечных пятен, напряженность среднего магнитного поля, поток радиоизлучения на частоте 2800 МГц, поток излучения в ультрафиолете и рентгене, форма и структура солнечной короны. Наиболее известной шкалой солнечной переменности является 11-летний цикл солнечной активности (ЗиВ, 1992, № 1; 2001, № 2; 2011, № 1). Он характерен такими явлениями, как: солнечные пятна, факелы, вспышки, корональные выбросы массы; их количество и частота появления изменяются со временем. Изменения этих глобальных параметров со временем демонстрируют сложную структуру на различных временных масштабах, кажущуюся хаотической. Применение методов нелинейной динамики – фрактального и кластерного анализа – к временным рядам глобальных индексов солнечной переменности позволило выделить нерегулярные и квазирегулярные составляющие этих рядов, исследовать их свойства.

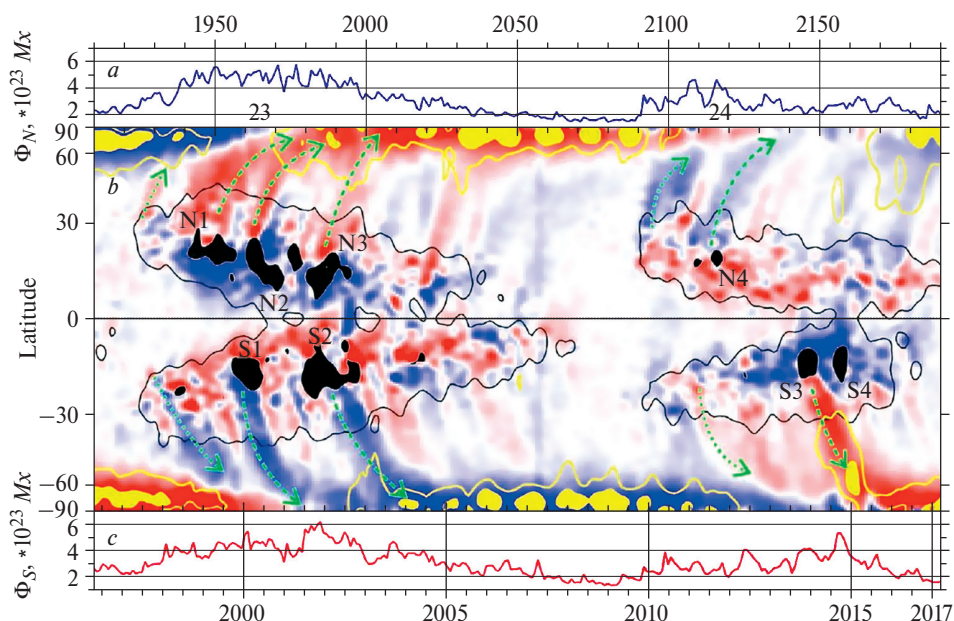
Солнечная переменность имеет случайную природу на временном отрезке до 2 месяцев, от 2 месяцев до 2 лет переменность имеет характер фликкер-шума (электронный шум, его источниками могут быть неоднородности в проводящей среде), что указывает на действие механизма самоорганизации при формировании долгоживущих

активных областей. Квазирегулярная структура переменности Солнца проявляется на временных масштабах более 2 лет, обладает нелинейными и квазипериодическими свойствами и ведет себя подобно нелинейному осциллятору с фрактальной размерностью около 2, обнаруживая признаки перемежающегося хаоса¹. Поэтому теоретические модели, основанные на детерминистском подходе, способны в общих чертах описать только квазирегулярную составляющую солнечной переменности.

ПРИРОДА ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Если бы на Солнце действовали только ядерные и гравитационные силы, то общая картина его эволюции отражала бы постепенную диссипацию тепловой энергии, лишь иногда нарушаемую взрывными процессами. Возмутителем спокойствия и причиной переменности является магнитное поле. Энергия, выделяющаяся внутри Солнца, вызывает конвективные и турбулентные движения в его внутренних слоях. Эти движения плазмы действуют подобно динамо-машине. Магнитные поля, увлекаемые движениями плазмы, растягиваются, изгибаются, усиливаются. Механическая энергия преобразуется в энергию магнитного поля. Для действия динамо на Солнце необходимы два условия: вращение и наличие достаточно глубокой конвективной зоны. Дифференциальное вращение в конвективной зоне, при котором экваториальные области вращаются быстрее, чем высокоширотные, вытягивает полоидальное магнитное поле (направленное вдоль линий, проходящих через полюсы сфе-

¹ Salakhutdinova I.I. Solar Physics. 1999. V. 188. P. 377.



Графики изменений магнитного потока (в Максвеллах) в северном и южном полушариях Солнца (а, с), широтно-временное распределение магнитных полей в 23-м и 24-м циклах. По осям абсцисс указано время в эррингтоновских оборотах (сверху) и в годах (снизу). Магнитные поля положительных и отрицательных полярностей указаны в синем и красном цветах (b). Черным окрашены зоны интенсивного пятнообразования (N1-N4, S1-S4), зональная плотность магнитного потока которых превышает 27 Гс. Униполярные магнитные поля, дрейфующие к полюсам Солнца, отмечены стрелками. Желтыми контурами показаны области частого появления корональных дыр, долгоживущие полярные дыры отмечены желтыми пятнами. Результат Е.М. Голубевой и А.В. Мордвинова

рической системы координат) и наматывает его силовые линии вокруг оси Солнца. Таким способом из полоидального магнитного поля образуется тороидальное, которое постепенно усиливается. Циклонические вихри в конвективной зоне регенерируют из тороидального магнитного поля (полоидальное поле противоположного знака). Так, в общих чертах, теория солнечного динамо описывает циклическое изменение магнитного поля Солнца.

Магнитное поле, усиленное неоднородным вращением, в свою очередь, оказывает влияние на дифференциальное вращение. Учет влияния магнитного поля на движение вещества приво-

дит к развитию нелинейной теории динамо. Большой вклад в развитие такой теории был сделан в ИСЗФ СО РАН, где создана реалистическая модель динамо, включающая не только уравнения генерации магнитных полей, но и описывающие закон вращения конвективной оболочки с учетом влияния магнитных полей на источники дифференциального вращения.

Наша модель описывает закон дифференциального вращения Солнца, который удовлетворительно воспроизводит основные особенности изменения вращения внутренних слоев Солнца, полученные из наблюдений методами гелиосейсмологии (ЗиВ, 1983, № 3;

2005, № 6). Модель объясняет вековые циклы солнечной активности как результат влияния магнитного поля на поток углового момента, поддерживающего дифференциальное вращение. Период векового цикла напрямую связан с характерным временем реакции дифференциального вращения на магнитные возмущения переноса углового момента. Модель объясняет, почему возникает асимметрия активности полушарий Солнца, когда количество солнечных пятен в 11-летнем цикле квазирегулярно преобладает то в его северной, то в южной полусфере. Модель поясняет также то, что хаотические вариации солнечной переменности могут быть вызваны взаимодействием крупномасштабного магнитного поля и дифференциального вращения Солнца. Изучено влияние крупномасштабных магнитных полей на светимость Солнца и стратификацию конвективной зоны. Получены

значения изменений радиуса Солнца и вариаций дифференциального вращения при циклических изменениях магнитного поля Солнца.

Установлено, что после распада долгоживущих центров активности происходят процессы, охватывающие все слои атмосферы Солнца. В фотосфере формируются униполярные магнитные области, которые переносятся в высокие широты меридиональными течениями². В короне формируются ансамбли корональных дыр, играющие важную роль в глобальной реорганизации открытого магнитного потока. По мере переноса униполярных магнитных областей к полюсам, внутри них формируются высокоширотные корональные дыры, которые затем превращаются в полярные корональные дыры. Например, в 23-м и 24-м циклах хорошо видна глобальная реорганизация магнитных полей Солнца и формирование полярных корональных дыр.

Здание Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН с большим внеатмосферным солнечным коронографом: объектив диаметром 535 мм, фокусное расстояние – 12 м. Коронограф является одним из крупнейших в мире, он оснащен спектрографом и узкополосными фильтрами, предназначен для изучения короны вне затмений и хромосферы Солнца



ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНО-МАСШТАБНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

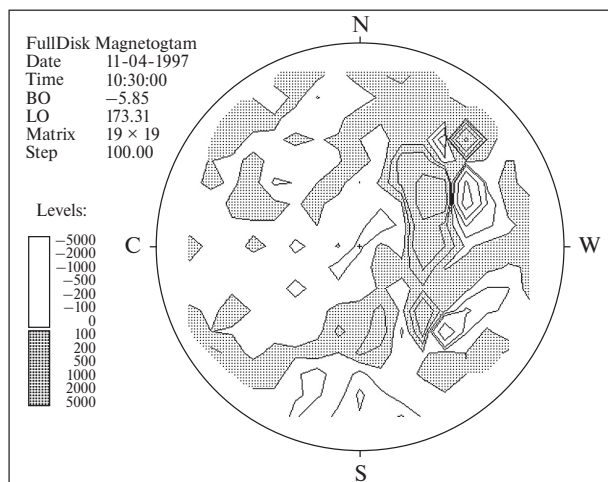
Экспериментальные исследования крупномасштабных магнитных полей и их эволюции представляют собой трудную задачу. Измерение напряженности таких полей связано с измерениями поляризации света в спектральных линиях, чувствительных к магнитному полю. Для измерения слабых крупномасштабных полей напряженностью 1–10 Гс необходимо измерять степень поляризации с точностью 10^{-4} – 10^{-5} . Такие измерения и построение карт напряженности магнитного поля на солнечной поверхности проводят Стенфордская обсерватория (США), Саянская обсерватория ИСЗФ СО РАН и с недавних пор Горная астрономическая станция ГАО РАН в Кисловодске. Синоптические наблюдения фоновых магнитных полей служат основой для изучения эволюции полоидальной и тороидальной компонент магнитного поля. Закономерности в распределении

этих компонент по широте Солнца и их изменений в цикле активности служат критериями выбора тех или иных моделей солнечного динамо².

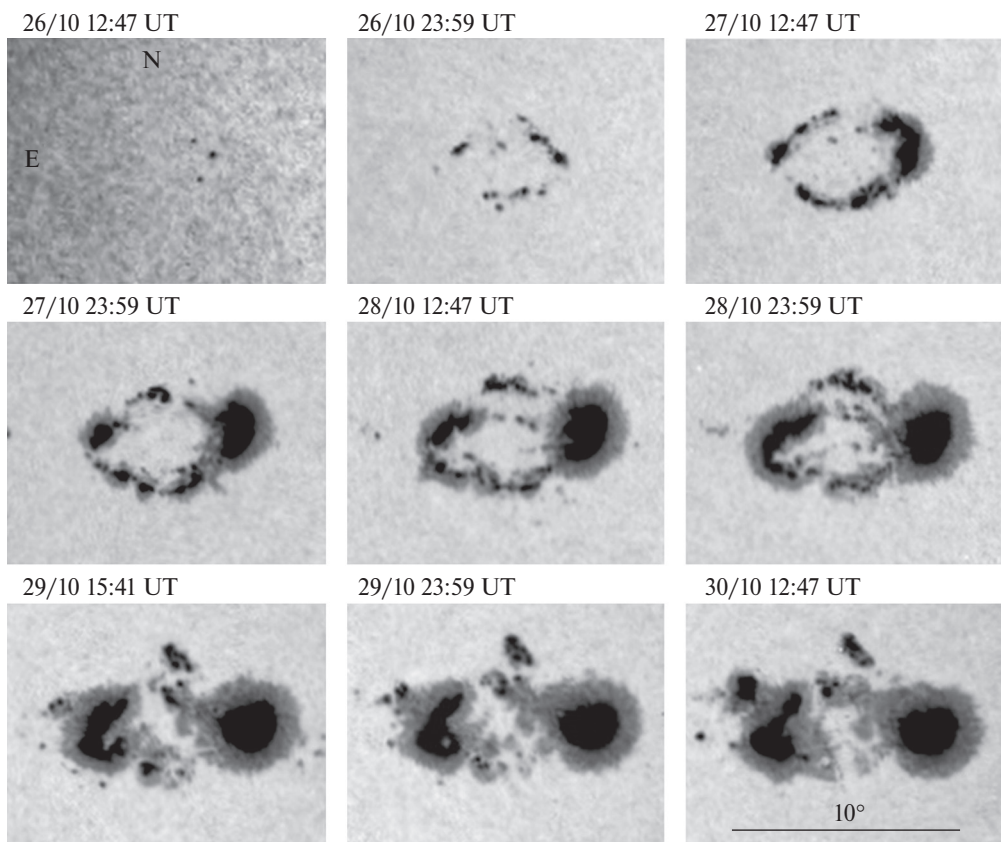
В последние годы система измерения фоновых магнитных полей на Саянской обсерватории получила дальнейшее развитие. Круговая поляризация, или V-параметр Стокса, одновременно записывается в нескольких спектральных линиях. Распределение V-параметра по контуру спектральной линии дает информацию о том, как изменяется с глубиной в солнечной атмосфере величина магнитного поля и скорость движения замагниченной плазмы. Анализ первых наблюдений показал несимметричное распределение V-параметра Стокса в спектральной линии, и даже аномальный характер в областях, где магнитное поле меняет знак. Это указывает на сложную топологию магнитного поля и открывает возможность более полной диагностики солнечных магнитных полей и их взаимодействия с движениями плазмы в солнечной атмосфере.

Усиленное тороидальное магнитное поле внутри конвективной зоны из-за неустойчивости, связанной с магнитной плавучестью, прорывается к поверхности и образует группы солнечных пятен и комплекс явлений, составляющий понятие активной области. Магнитная плавучесть проявляется в области более сильного магнитного поля, находящегося между участками с более слабым полем. Полное давление

Магнитограмма крупномасштабного магнитного поля Солнца, полученная в Саянской солнечной обсерватории 11 апреля 1997 г. в 10 ч 00 мин. Слева – шкала в миллигаусс, заштрихована южная полярность



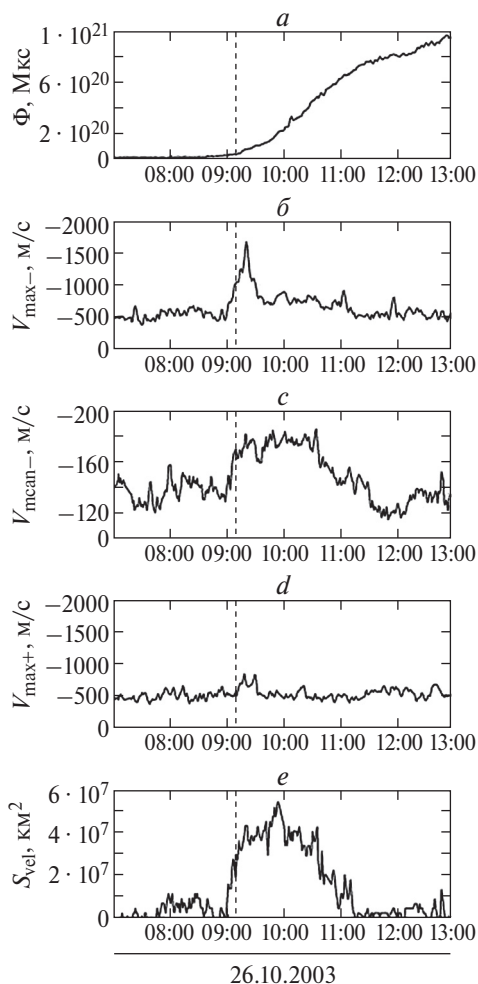
² Golubeva E.M., Mordvinov A.V. Solar Physics. 2017. V. 292. P. 175.



Рождение группы пятен на Солнце 26–30 октября 2003 г.

в каждой области равно сумме давлений магнитного поля и плазмы. При одинаковой температуре в области с меньшим давлением будет меньшая плотность. На область с меньшей плотностью сила тяготения оказывает меньшее действие, и она стремится всплыть. Появление пар солнечных пятен и биполярных магнитных областей представляет собой локальные «всплытия» тороидальных трубок магнитного потока на поверхность Солнца. Этот всплывающий магнитный поток как бы переносит энергию вращения, конвективных движений, турбулентности, запасенную в магнитном поле, в верхние слои солнечной атмосферы – хромо-

сферу и корону. Запасенная таким способом магнитная энергия греет хромосферу и корону, выбрасывает протуберанцы и горячее корональное вещество, генерирует солнечные вспышки и солнечный ветер. Энергия теряется из замкнутых магнитных областей излучением (особенно в ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях спектра), выносом корональной массы, эруптивными процессами, а из открытых магнитных структур, в корональных дырах и корональных лучах или стримерах – постоянным переносом массы. Изучение природы различных форм солнечной активности – активных областей, солнечных вспышек,



Графики временного хода параметров активной области NOAA 10488, по данным космической обсерватории «SOHO» (NASA), а – полный магнитный поток, б – максимальная отрицательная доплеровская скорость, в – средняя отрицательная доплеровская скорость, г – максимальная положительная доплеровская скорость, д – площадь отрицательных доплеровских скоростей внутри изолинии – 500 м/с. Вертикальной штриховой линией отмечено время начала выхода магнитного потока. Видно, что этот выход сопровождается кратковременным подъемом плазмы с магнитным полем из конвективной зоны Солнца

пятен, протуберанцев и корональных структур – также составляет предмет наших исследований.

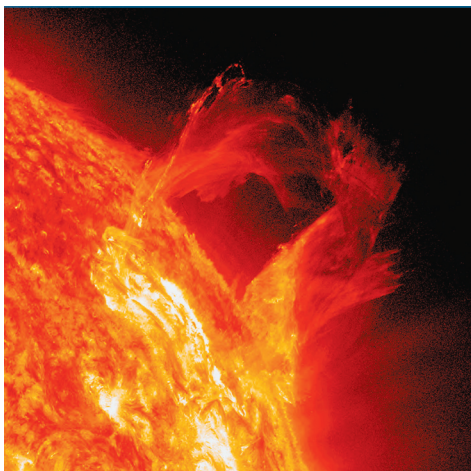
ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГРУПП ПЯТЕН

Первые экспериментальные подтверждения всплытия тороидальных трубок магнитного потока новой активности были получены в нашем институте. Детальное изучение динамики магнитного поля при возникновении солнечных пятен позволило выяснить роль конвективных движений в процессе формирования активной области. Недавно при изучении возникновения мощной группы пятен было обнаружено появление конвективного пузыря на самой ранней стадии образования новой группы солнечных пятен. О всплытии нового магнитного потока свидетельствует кратковременное возрастание скорости подъема вещества из более глубоких слоев на поверхность³.

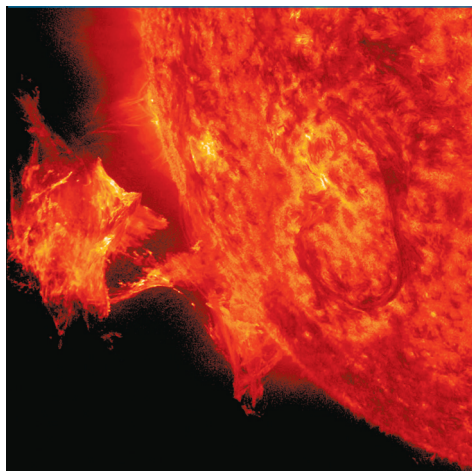
Во всей атмосфере Солнца, от фотосферы до короны, существует сильная турбулентность в плазме, характеризующейся большими (до 10^6) числами Рейнольдса. В этих условиях, в неравновесной среде идут процессы самоорганизации и формируются сложные структуры, проявляющие свойства самоподобия, или масштабной инвариантности. Это обуславливает эффективность применения мультифрактального анализа, описывающего наблюдаемое распределение как совокупности наборов самоподобных структур (в точности или приближенно совпадающего с частью себя самого, то есть целое имеет ту же форму, что и одна или более частей), имеющей непрерывный мультифрактальный спектр «фрак-

³ Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. *Астрономический журнал*. 2011. Т. 88, № 2. С. 184.

а



б



Солнечные протуберанцы: а – всплывший менее чем за 4 часа всполох горячей плазмы 7 августа 2017 г.; б – искривленный сгусток ионизованного гелия температурой 60 000 К, выброшенный 10 июля 2018 г. Снимки сделаны «Солнечной динамической обсерваторией». Фото NASA

тальная размерность – показатель сингулярности»³. В областях нового магнитного потока в развивающихся активных областях мультифрактальный спектр уширен по сравнению со спектром окружающих участков, что, вероятно, свидетельствует о быстро протекающем процессе структурной перестройки, характерном для системы в состоянии самоорганизованной критичности, в комбинации с подъемом из глубины новых объемов плазмы⁴. Этот эффект уширения спектра позволяет выявлять новые магнитные потоки на сегментированных изображениях, рассчитанных для малых фрактальных размерностей.

СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТУБЕРАНЦЫ

Солнечные протуберанцы или волокна – удивительные явления солнечной активности (ЗиВ, 2001, № 2). Как об-

разуются и существуют относительно холодные облака вещества (температура не выше 10 000°) внутри короны с температурой около миллиона градусов? Длина некоторых волокон достигает 1 млн км и сравнима с радиусом Солнца ($6,955 \times 10^5$ км). Сейчас можно считать доказанным, что основной силой, поддерживающей холодное более плотное вещество внутри горячей разреженной короны, является магнитное поле. Оно же обеспечивает и термическую изоляцию вещества волокна от горячего окружения. Но многие детали процесса формирования волокна, его стабильности (спокойные волокна могут существовать до нескольких месяцев) и исчезновения остаются предметом исследований.

По наблюдениям на вектор-магнитографе Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН мы изучили структуру магнитного поля и движений под солнечным волокном. Вектор-магнитограф позволяет измерить не только величину магнитного поля, но и его направление.

⁴ Головки А.А., Салахутдинова И.И. *Астрономический журнал*. 2015. Т. 92. С. 650.

Обычно волокно расположено над линией раздела полярностей магнитного поля. Силовые линии магнитного поля выходят из области северной полярности, поднимаются в корону и возвращаются обратно в фотосферу в области южной полярности, образуя, таким образом, петли или арки над линией раздела полярностей. Если на вершине арки каким-то образом образуется прогиб или арка, то холодное плотное вещество могло бы «висеть» в этой «ямке» над фотосферой. Магнитные силы удерживали бы вещество от падения под действием силы тяжести. Как может возникнуть такая топология магнитного поля?

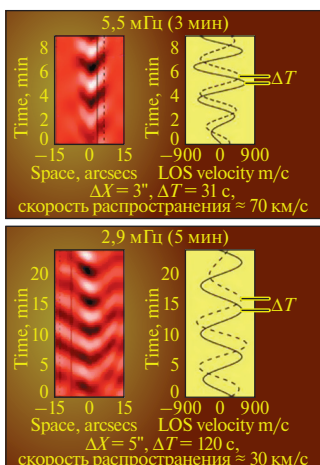
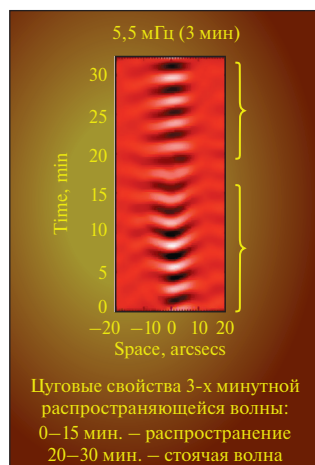
Существует несколько гипотез. Наши наблюдения позволили предложить новую качественную модель магнитного поля спокойного волокна. Анализ наблюдений показал, что в области волокна происходят изменения в структуре конвективных ячеек-супергранул. Они располагаются вдоль линии раздела полярностей крупномасштабного магнитного поля таким образом, что волокно лежит над почти непрерывной линией, образованной границами конвективных ячеек. Вектор-магнитограммы показывают, что в окрестности волокна в фотосфере магнитное поле на-

правлено горизонтально вдоль линии раздела полярностей. Модель формирования волокна учитывает детерминированную природу крупномасштабной арочной структуры магнитного поля в короне над линией раздела полярностей и стохастическую природу непрерывно всплывающих на границах конвективных ячеек тонкоструктурных магнитных волокон, имеющих спиральную скрученность.

ЛОКАЛЬНАЯ ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЯ

В последние годы развивается новое направление в солнечной физике – локальная гелиосейсмология (ЗиВ, 1992, № 2). В солнечной атмосфере в результате действия турбулентности существуют звуковые колебания, волны сжатия и разрежения. Взаимодействие волновых движений с различными образованиями в солнечной атмосфере может служить методом изучения внутренней структуры солнечных пятен, волокон и других явлений. В Саянской обсерватории высокоточным дифференциальным методом измерялись колебания и волновые движения в волокнах и протуберанцах. Обнаружен новый тип колебаний с периодом около 40 мин и изучены свойства этих коле-

баний. Магнитное поле волокна представляет собой своеобразный «каркас», взаимодействие которого с полем колебаний и волн



На магнитограммах показаны свойства распространяющейся 3-минутной волны на пространственно-временной диаграмме, превращение бежущей волны в стоячую. Справа – особая треугольная («шевроновая») форма распространяющейся волны

в окружающей среде, особенно в хромосфере, может обеспечить путь для получения дополнительной информации о структуре этого «магнитного каркаса» волокна, видимого на краю диска как протуберанец.

В Саянской обсерватории нашего института изучены стационарные и волновые движения в солнечных пятнах и их окрестностях, получены новые свойства этих явлений, важные в решении проблемы баланса массы и энергии в солнечном пятне. Доктором физико-математических наук Н.И. Кобановым (2004) впервые были получены наблюдательные доказательства бегущих волн в тени солнечных пятен⁵. Показано, что хорошим индикатором распространяющихся волновых движений в области солнечного пятна являются особые «шевроновые» структуры на пространственно-временных диаграммах лучевой скорости. Они позволяют непосредственно диагностировать распространение колебаний из нижних слоев атмосферы в корону Солнца.

КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ

Магнитное поле в самой внешней разреженной оболочке Солнца – солнечной короне – создает многообразие структурных форм и динамических явлений, которые можно видеть с Земли во время полных солнечных затмений и регулярно – с помощью телескопов-коронграфов, установленных на космических аппаратах (ЗиВ, 2003, № 3). Газ в короне ионизован, атомы водорода и гелия лишены электронов, а атомы более тяжелых элементов теряют большую часть своих электронов. Высокая степень ионизации говорит о чрезвычай-



Солнечная корона во время полного затмения 9 марта 2016 г. Снимок сделали М. Семёнов, А. Олешко, А. Юферев

чайно высокой температуре, которая достигает 1–2 млн градусов. Акустические и магнитогидродинамические волны переносят энергию из нижних слоев Солнца и греют корону.

Солнечная корона служит источником солнечного ветра – непрерывного потока частиц со средней скоростью 300 км/с (ЗиВ, 2008, № 1; 2010, № 1; 2018, № 1). Сложная структура магнитного поля в короне создает различные условия для потока частиц и приводит к неоднородным потокам солнечного ветра. Наиболее замечательными структурными элементами короны, бросающимися в глаза во время полных затмений, являются корональные лучи или стримеры. Их количество и расположение значительно различаются в эпохи максимума и минимума солнечной активности. Было показано (в т.ч. используя собственные наблюдения полных солнечных затмений в 1997 и 1998 гг.), что стримеры, расположенные над линией раздела полярностей глобального магнитного поля Солнца, образуют основной пояс стримеров. Изменение топологии магнитного поля Солнца от минимума к мак-

⁵ Kobanov N.I., Makarchick D.V. Astron. & Astrophys. 2004. V. 424. P. 671.



Кандидат физико-математических наук В.И. Поляков и член-корреспондент АН СССР В.Е. Степанов проводят исследования на солнечном телескопе Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН. 1971 г.

симуму активности приводит к изменению формы короны и структуры корональных лучей. Самыми динамичными явлениями в солнечной короне являются выбросы корональной массы, которые наиболее часто связаны с солнечными вспышками и эруптивными волокнами. Показано, что существует тесная связь корональных стримеров и выбросов корональной массы. Формирование и исчезновение стримеров усиливает генерацию корональных выбросов, подавляющая часть выбросов происходит вблизи стримеров. Корональные выбросы уходят в межпланетное пространство, формируют ударную волну и переносят к магнитосфере Земли потоки ускоренных частиц и магнитные поля. Взаимодействие их с земной магнитосферой вызывает геомагнитные возмущения и комплекс явлений в верхней атмосфере Земли. Исследование свойств корональных выбросов – мест возникновения, структуры, размеров, скорости и направления движения, динамика их в межпланетном пространстве является важным аспектом в проблеме «погоды» в околоземном космическом пространстве.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ И FIP-ЭФФЕКТ

Важным направлением исследований является изучение механизмов солнечной активности, приводящих к возникновению солнечных вспышек (ЗиВ, 2002, № 6; 2005, № 2; 2013, №№ 3, 5; 2016, № 5). В Байкальской астрофизической обсерватории института с помощью Большого солнечного вакуумного телескопа выполнен цикл работ по экспериментальному исследованию нагрева солнечной хромосферы пучками энергичных частиц во время солнечных вспышек. Доктором физико-математических наук Н.М. Фирстовой и кандидатом физико-математических наук В.И. Поляковым сделана оценка энергии пучков протонов⁶. Для мощных вспышек построена модель с учетом поляризации во взрывной фазе вспышки, вызванной бомбардировкой хромосферы пучками быстрых электронов (модель «толстой мишени»).

Химический состав вещества в разных слоях Солнца – фотосфере, хромосфере, короне, в основном, считался постоянным. Однако в последнее время широко обсуждается обнаруженный так называемый FIP-эффект – повышенное содержание элементов с низким значением первого потенциала ионизации (< 10 эВ) в короне, солнечном ветре и потоках солнечных энергичных частиц. Эффект FIP интересен в связи с фундаментальной проблемой химического состава Вселенной: для Солнца он важен в связи с динамикой хромосферы и локализации источников солнечного ветра. Впервые была поставлена задача

⁶Firstova N.M., Polyakov V.I., Firstova A.V. Solar Phys. 2012. V. 279. P. 453.



Астрофизики Сибири. Картина иркутского художника Г.В. Богданова

о влиянии возможного изменения химического состава с высотой в хромосфере на сильные линии ионов кальция над солнечными пятнами. Оказалось, что аномально высокие значения отношения центральных интенсивностей двух линий резонансного дублета ионов кальция, измеренные в спектрах солнечных пятен, вполне объясняются действием эффекта FIR в нижней атмосфере. Эти исследования выполнила доктор физико-математических наук Р.Б. Теплицкая.

На основе анализа данных, переданных американской АМС «Улисс» («Ulysses»; ЗиВ, 2009, № 5), исследовавшей Солнце в 1994–2008 гг., была выявлена связь вариаций FIR-эффекта с циклом солнечной активности и геомет-

рией крупномасштабного магнитного поля⁷. Сотрудником ИСЗФ СО РАН В.М. Томозовым и учеными Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова (г. Алма-Ата, Казахстан) Г.С. Минасянцем и Т.М. Минасянц было установлено, что при сопоставлении зарядовых состояний ионов железа $Q(\text{Fe})$ и величины отношения Fe/O в плазме ряда солнечных корональных выбросов массы при $Q(\text{Fe}) > 13$ резко усиливаются проявления FIR-эффекта, связанные с возрастанием относительного содержания ионов железа⁸.

⁷ Пипин В.В., Томозов В.М. Астрономический журнал. 2018. Т. 95, № 4. С. 299.

⁸ Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 1. С. 34–58.

ВОСПОМИНАНИЯ О БУДУЩЕМ

В период бурного развития Института солнечно-земной физики со времени его основания в 1960 г. (он назывался СиБИЗМИР; ЗиВ, 2007, № 2), когда создавались его обсерватории на выносных полигонах за пределами города, первые его сотрудники показали замечательные примеры трудовой романтики. Поэтому неслучайно на обсерватории приезжали художники, писатели, кинематографисты и создавали

привлекательные образы в картинах, художественной литературе, на экране. В последние годы начата реализация проекта по созданию на базе института Национального гелиогеофизического комплекса Российской академии наук с крупными современными инструментами, использование которых позволит сохранить ведущие позиции в области физики солнечно-земных связей и оперативных прогнозов космической погоды, имеющих для России как космической державы важное экономическое значение.



Доктор физико-математических наук Рина Бенедионовна Теплицкая (1926–2016), выполнившая ряд важных работ по магнитному усилению линий в спектре пятен, морфологическим особенностям линий H и Ca II над солнечными пятнами, обоснованию моделей солнечного пятна, влиянию короткопериодических колебаний в фотосфере на профили спектральных линий



Доктор физико-математических наук Валерий Иосифович Скоморовский. Вместе с оптической группой ИСЗФ создал и продолжает создавать первоклассную оптику для обсерваторий института



Доктор физико-математических наук Самуил Иосифович Вайнштейн (1946–2015), один из основоположников теории солнечного динамо

ВЗГЛЯД НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ ЧЕРЕЗ GPS И ГЛОНАСС



ЯСЮКЕВИЧ Юрий Владимирович,

кандидат физико-математических наук

ЯСЮКЕВИЧ Анна Сергеевна,

*кандидат физико-математических наук
Институт солнечно-земной физики СО РАН*

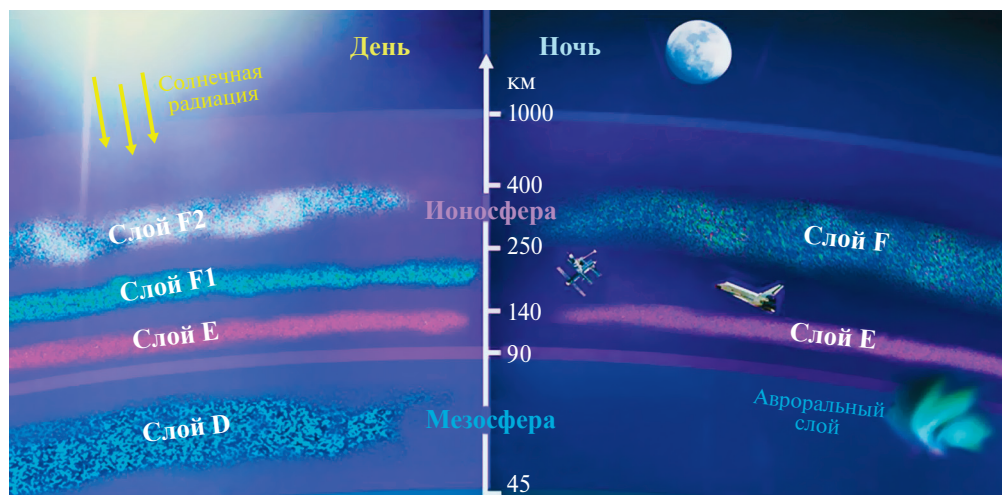
DOI: 10.7868/50044394820040064

Ионосфера – это слой земной атмосферы, в котором содержится большое количество заряженных частиц. Заряженная составляющая ионосферы оказывает ключевое воздействие на распространение радиоволн, поэтому изучение состояния ионосферы является важной научно-практической задачей. Ионосфера Земли является сложной динамической системой, на которую влияют солнечный ветер, процессы в нейтральной атмосфере, магнитосфере и на Солнце. В статье рассмотрены возможности изучения ионосферы Земли с использованием глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS и ГЛОНАСС. Развита глобальная сеть приемников сигналов GPS/ГЛОНАСС предоставила колоссальный экспериментальный материал

для изучения ионосферы и позволила по-новому взглянуть на происходящие в ней процессы.

ИОНОСФЕРА ЗЕМЛИ – ИНДИКАТОР ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Ионосферой называют часть Земной атмосферы, где имеется достаточно большое количество заряженных частиц: электронов, атомарных и молекулярных ионов (в основном кислородных). Иногда считают, что в ионосфере преобладают заряженные частицы. На самом деле это не так. Например, на высотах F-слоя (порядка 300 км), где концентрация заряженных частиц максимальна, нейтральных частиц в 20 раз



Строение ионосферы Земли. Сайт: www.bastabalkana.com

больше. Тем не менее именно заряженная составляющая ионосферы оказывает ключевое воздействие на распространение радиоволн. Так, благодаря наличию ионосферы возможно распространение радиосигнала вокруг Земли и загоризонтная радиолокация и радиосвязь. С другой стороны, различные неоднородности, присутствующие в ионосфере, оказывают существенное влияние на распространяющийся радиосигнал, могут создавать помехи и препятствовать устойчивой радиосвязи. Поэтому изучение состояния ионосферы оказывается важной задачей для радиофизики.

Ионосфера располагается от высот порядка 50 км до примерно 1000 км, однако не имеет жестких высотных границ. Нижняя ее граница определяется чувствительностью приборов для регистрации электронной концентрации. Верхняя граница постепенно переходит в плазмосферу (тоже заряженный слой, но состоящий преимущественно из электронов и протонов).

Важной особенностью ионосферы является то, что она чувствительно реагирует на процессы на Солнце и в бли-

жайших геосферах (нейтральной атмосфере, магнитосфере, литосфере). Возникающие в ионосфере волновые процессы искусственного или естественного происхождения могут распространяться на значительные расстояния. Характер этих волновых возмущений может дать дополнительную информацию о происходящих явлениях. Поэтому исследование процессов в ионосфере представляет интерес не только с практической точки зрения, но и для фундаментальных научных задач.

GPS/ГЛОНАСС И ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Как же навигационные спутниковые системы помогают в изучении ионосферы? Когда в 1960–1970-х годах шла разработка американской системы GPS (Global Positioning System) и российской системы ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система), перед инженерами и учеными стояла задача получить координаты с высокой точностью до десятков и единиц

метров. Для этого требовалось, чтобы навигационный спутник испускал сигнал на высоких частотах, поэтому навигационные системы работают в гигагерцовом диапазоне. Однако создателями систем было обнаружено, что даже на этих частотах ошибка, которая возникала в связи с распространением спутникового сигнала через ионосферу, достигала 20 м при высокой солнечной активности. Во время магнитных бурь ошибка увеличивалась до гораздо больших величин, особенно в регионах вблизи экватора, где в ионосфере располагается экваториальная аномалия – область повышенной электронной концентрации. В результате исследований было принято решение, что для оценки ионосферной ошибки необходимо использовать измерения на двух близких частотах. На каждой из частот ошибка зависит от частоты сигнала и прямо пропорциональна

суммарному (интегральному) числу электронов вдоль пути распространения радиосигнала от спутника до приемника. Рабочие частоты систем были выбраны в диапазоне $\sim 1,6$ ГГц (основная частота L_1) и $\sim 1,2$ ГГц (вспомогательная частота L_2). Комбинация измерений на двух разных частотах позволяет оценить ошибку, вносимую ионосферой, и убрать ее из навигационного решения.

С другой стороны, в руках исследователей оказались побочные измерения интегрального числа электронов (на первый взгляд исключительно мешающие нормальной работе). Эта величина получила название «Полного электронного содержания» (ПЭС), или в английской литературе – Total Electron Content (TEC). Единица измерения ПЭС представляет собой количество электронов в столбе с сечением один квадратный метр вдоль луча

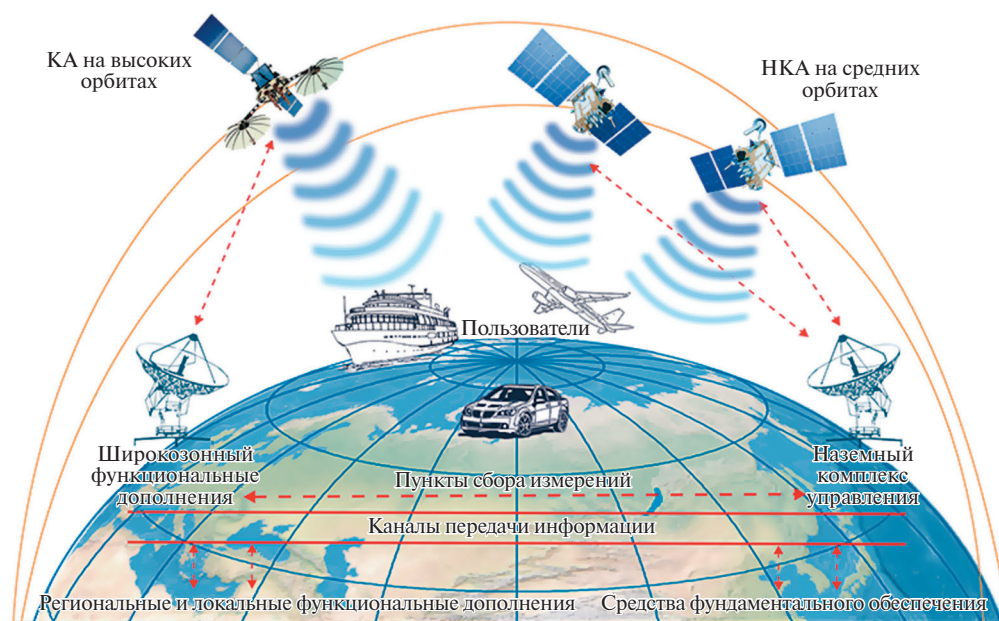
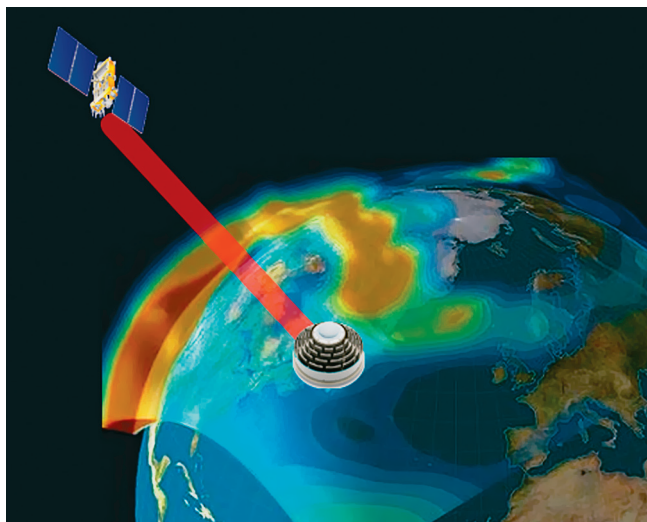


Схема работы российской системы ГЛОНАСС.

Сайт: <https://naukatehnika.com/zhizn-bez-sputnikov-novye-sistemy-navigacii.html>



Распространение спутникового сигнала до приемника, вдоль которого определяется ПЭС. Полное электронное содержание определяется вдоль луча спутник-приемник (красный цвет)

спутник-приемник, измеряемая в единицах TECU (10^{16} электронов/ м^2). Этот луч имеет наклон от вертикали, зависящий от взаимного расположения приемника и спутника. Такая геометрия распространения сигнала (и проведения измерений) типична для любых существующих в настоящее время двухчастотных спутниковых систем, включая американскую GPS (Navstar), отечественную ГЛОНАСС, европейскую Galileo, китайскую BeiDou (Compass), ряд региональных систем, а также дифференциальные дополнения SBAS.

Важным преимуществом GPS/ГЛОНАСС, по сравнению с другими методами исследования ионосферы, является глобальность спутниковой группировки, обеспечивающая одновременное наблюдение в любой точке земного шара не менее четырех спутников каждой из систем. При этом на средних и экваториальных широтах

в настоящее время может наблюдаться одновременно до 40 спутников разных систем: GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), Galileo (ЕС), BeiDou (Китай).

Для приема спутникового сигнала на двух частотах требуются специализированные приемники. Глобальность инструмента обусловлена также тем, что сеть таких специализированных приемных станций активно развивается. Данные многих приемников свободно предо-

ставляются в сети Интернет. В настоящее время в свободном доступе находятся данные с около 5000 приемников. Существуют сети, данные которых могут быть получены по запросу для научных исследований. Например, плотная японская сеть GSI (1200 станций на территории Японии), сеть SMART-NET или сети NIVE и EFT-CORS на территории России. То есть, благодаря измерениям GPS/ГЛОНАСС, исследователи могут получить данные об ионосфере практически по всему миру.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ КАРТЫ И ГЛОБАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ

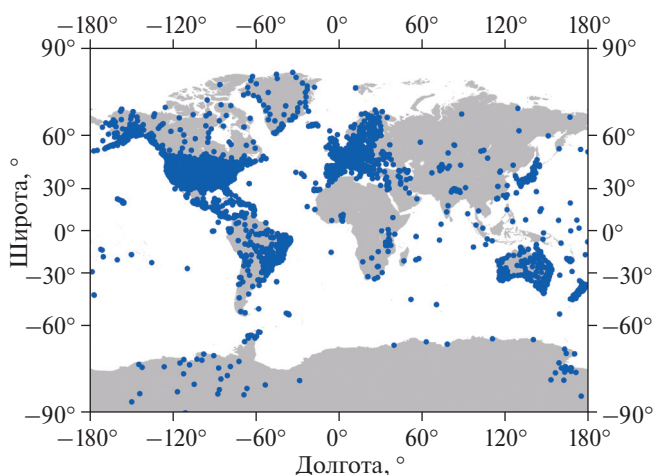
Широкое покрытие сети приемников позволило ученым получать измерения ПЭС практически по всему миру и на основе этих измерений рассчитывать глобальные ионосферные карты (Global Ionosphere Maps – GIM). Эти карты представляют собой сетку размером 5° по долготе и $2,5^\circ$ по широте. В каждом узле сетки содержится значение ПЭС в заданный момент времени. В настоящее время такие карты рассчитываются в нескольких лабора-

ториях и предоставляются в свободное пользование. Приведем пример глобальной карты ПЭС, рассчитанной Лабораторией реактивного движения США (JPL, NASA), для 17 марта 2015 г. в 22 часа всемирного времени (UT), во время сильной геомагнитной бури. На ней можно заметить, что электронная концентрация в ионосфере распределяется неравномерно. Наибольшее количество электронов наблюдается в дневное время в приэкваториальных областях, где образуются два гребня экваториальной аномалии. Гребни располагаются симметрично относительно геомагнитного экватора.

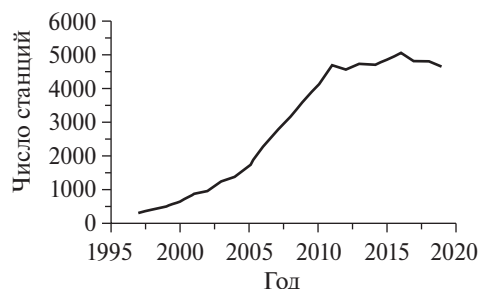
На основе таких карт возможно рассчитать величину, представляющую суммарное количество электронов во всей ионосфере – Глобальное электронное содержание (ГЭС). Единица измерения ГЭС – GECu (Global Electron Content unit) равна 10^{32} электронов.

ГЭС позволяет проводить исследования процессов, оказывающих влияние на ионосферу в глобальном масштабе. Так, динамика ГЭС строго следует за изменением солнечной активности – наиболее важный фактор для электронной концентрации ионосферы, поскольку интенсивность солнечного излучения влияет на ионизацию частиц. ГЭС изменяется от 0,35 до 3,15 GECu в 23–24-х циклах солнечной активности, то есть почти в 10 раз. Максимумы 23-го и 24-го солнечных циклов согласуются с максимальными значениями ГЭС, а минимумы – минимальным значениям ГЭС.

В циклах солнечной активности хорошо выражены колебания ГЭС с периодом 1 год, 0,5 года, 27 дней и 1 день.

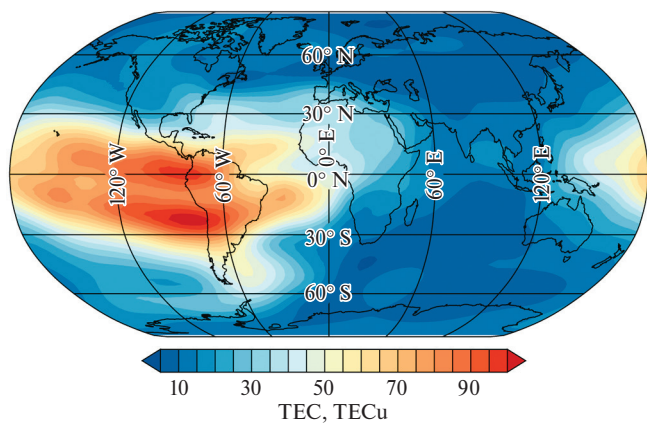


Расположение приемников навигационных систем с данными в свободном доступе на 1 января 2018 г.



Динамика числа приемных станций навигационных систем с данными в свободном доступе в 1997–2019 гг.

Годовая периодика связана с движением Земли по орбите вокруг Солнца. Полугодовые колебания отсутствуют в спектре солнечного излучения. В ГЭС полугодовая вариация обусловлена изменением системы нейтральных атмосферных ветров: нейтральный ветер на высотах ионосферы дует от летнего теплого полушария к зимнему, а в весенний и осенний периоды такой ветер отсутствует. 27-дневные вариации связаны с вращением Солнца: движе-



Пример глобальной карты ПЭС 17 марта 2015 г. Оттенками цвета показаны значения ПЭС в единицах TECu. По данным JPL, NASA



График глобального электронного содержания (по оси ординат отложены единицы GECU – 10^{32} электронов) в 23-м и 24-м циклах солнечной активности. Изменчивость ГЭС не только связана с 11-летним солнечным циклом, но и более быстрыми вариациями. По данным SIMuRG

ние активных областей при вращении Солнца приводит к изменениям потока солнечного излучения, что в свою очередь влияет на число электронов в ионосфере. Интересно отметить, что 27-дневные вариации максимальны на подъеме и на спаде солнечной активности, когда активных областей на Солнце уже достаточно (не минимум цикла), но еще и не настолько много (не максимум цикла), чтобы «замаскировать» модуляцию. Полугодовые и годовые вариации, напротив – максимальны в максимуме цикла и убывают с уменьшением солнечной активности. Суточные вариации в ГЭС – это проявление долготной асимметрии: на разных долготах электронная концентрация ионосферы немного отличается в одно и то же локальное время. Одна из основных причин такой асимметрии – наклон оси магнитного поля Земли.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

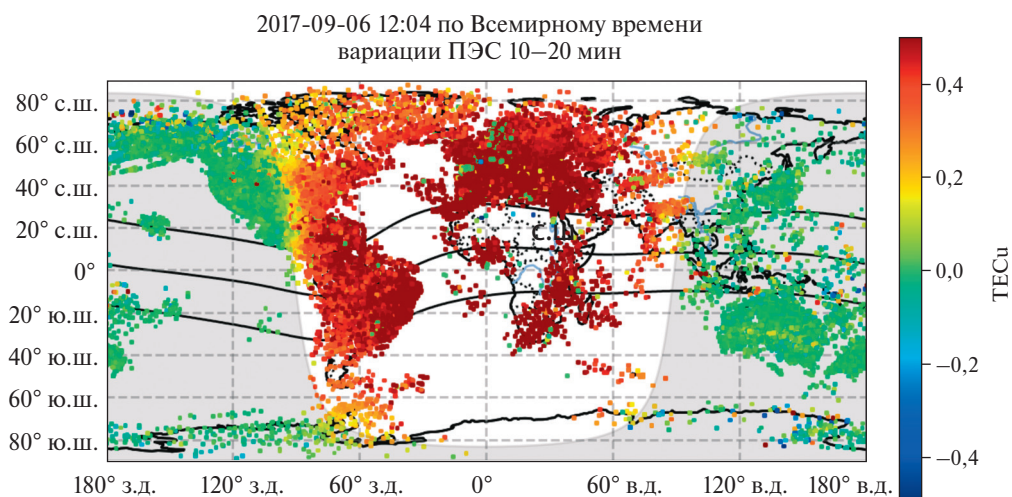
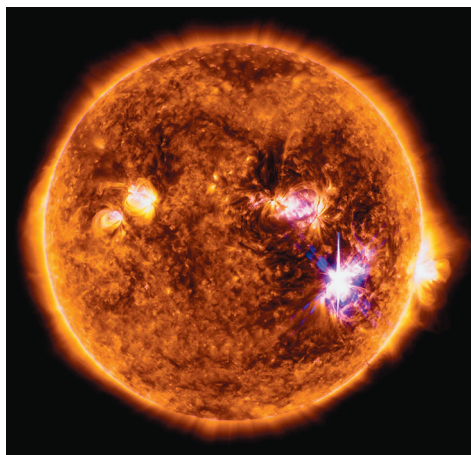
Вариации ПЭС на дневной стороне

Солнечная вспышка представляет собой высвобождение солнечной энергии в широком спектре длин волн, в том числе рентгеновском и ультрафиолетовом. Ультрафиолетовая часть спектра влияет на формирование F-слоя ионосферы, который располагается на высотах более 150 км и характеризуется максимальной электронной концентрацией. Солнечное излучение в рентгеновском диапазоне влияет на формирование D-слоя толщиной 60–90 км, ответственного за поглощение радиоволн.

Во время вспышки на Солнце происходит резкое увеличение ионизации на всей освещенной стороне ионосферы. Для выявления «тонких» эффектов

Серия вспышек на Солнце произошла 4–7 сентября 2017 г. 6 сентября произошла самая мощная вспышка за 12 лет, достигшая уровня X9.3. Снимок SDO NASA

Вариации ПЭС во время солнечной вспышки X9.3 6 сентября 2017 г. Карта представлена для 12:04:00 по Всемирному времени. Шкала справа указывает амплитуду вариаций ПЭС (единицы измерения – TECu). Затемненная область соответствует ночной стороне Земли. По данным SIMuRG

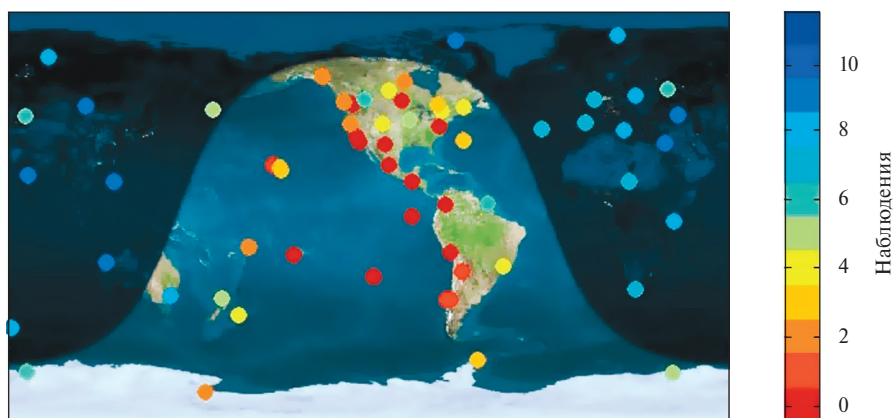


в ионосфере и исследования ионосферных неоднородностей во многих случаях удобно вместо непосредственно величины полного электронного содержания анализировать его вариации, то есть колебания ПЭС в определенном диапазоне периодов. Например, во время солнечной вспышки X9.3 6 сентября 2017 г. отчетливо наблюдалась положительная вариация, показывающая синхронный рост электронного содержания на всей освещенной стороне ионосферы. Если вспышка достаточно мощная (X-класс, или хотя бы M-класс),

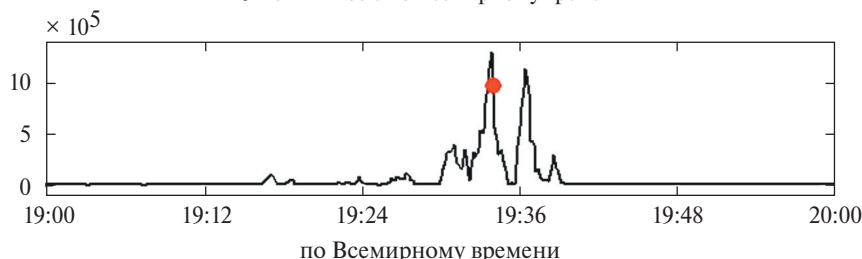
то эффект отчетливо наблюдается на всех лучах приемник–спутник.

Для слабых вспышек C-класса выявить эффект на отдельных лучах нельзя. Однако за счет того, что солнечная вспышка синхронно оказывает воздействие на всей освещенной стороне, суммирование измерений ПЭС по всем лучам дает возможность определять отклик в ионосфере даже на слабые вспышки. Отметим, что такой слабый эффект затруднительно выделить другими средствами диагностики ионосферы, даже очень чувствительными.

Международная сеть наблюдений, 6 декабря 2006 г.



19 ч 34 мин 00 с по Всемирному времени



Количество спутников GPS, сигнал с которых регистрируется приемниками международной сети, 6 декабря 2006 г. (вверху) во время сильной радиовспышки на Солнце. Точки показывают положение приемников, их цвет показывает, сигнал со скольких спутников GPS можно было зарегистрировать приемником в различных регионах земного шара. Желтый цвет означает, что наблюдается 4 спутника и навигация еще возможна, оранжевый и красный – навигация по GPS невозможна. Изменения потока солнечного радиоизлучения на частоте 1,6 ГГц показаны на графике внизу. По данным Корнельского университета (<https://gps.ece.cornell.edu>)

Анализ количественного воздействия солнечной вспышки на ионосферу в глобальном масштабе позволяет детектировать проявление реакции ионосферы в реальном времени, а также оценить интенсивность потока солнечного излучения в ультрафиолетовом диапазоне.

Солнечная вспышка как угроза стабильности

Солнечная вспышка может быть не только предметом изучения, но и являться угрозой стабильности функционирования навигационных спутни-

ковых систем. Связано это с тем, что Солнце во время вспышек может излучать, в том числе, и в той части диапазона частот, в которой работают системы GPS и ГЛОНАСС (1,2–1,6 ГГц). Достаточно сильный радиовсплеск может привести к значительному возрастанию шума на входе приемной аппаратуры. Хотя такие вспышки происходят нечасто, они время от времени случаются. Солнечные радиовсплески классифицируют согласно величине потока радиоизлучения S. В период 1997–2016 гг. произошло 120 сильных ($1000 < S \leq 10\,000$ солнечных единиц

потока – с.е.п., 10^{-22} Вт · м⁻² · Гц⁻¹), 17 опасных ($10\,000 < S \leq 100\,000$ с.е.п.) и 4 экстремальных ($S > 100\,000$ с.е.п.) солнечных радиовсплеска.

Один из таких радиовсплесков произошёл 6 декабря 2006 г. В этот день приемное оборудование зафиксировало падение отношения сигнал-шум на 20 Дб, что привело к срывам сопровождения сигнала в приемнике. Результатом такого срыва может являться существенное ухудшение точности получаемых координат и даже, в особых случаях, полная невозможность предоставления координат пользователю. Во время данной вспышки на подсолнечной стороне на протяжении около 10 мин навигация с использованием GPS была невозможна на большой территории.

КАРТИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Безусловным преимуществом GPS/ГЛОНАСС-технологии для ионосферных исследований является возможность получить глобальные пространственные карты неоднородностей ионосферы. Одно из направлений, которым последние несколько лет занимается наша научная группа – разработка сервиса для предоставления таких пространственных карт для всех заинтересованных пользователей. Проект мониторинга и исследования ионосферы SIMuRG (System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS; <https://simurg.iszf.irk.ru/>) позволяет каждому применить данные GPS/ГЛОНАСС для своих иссле-

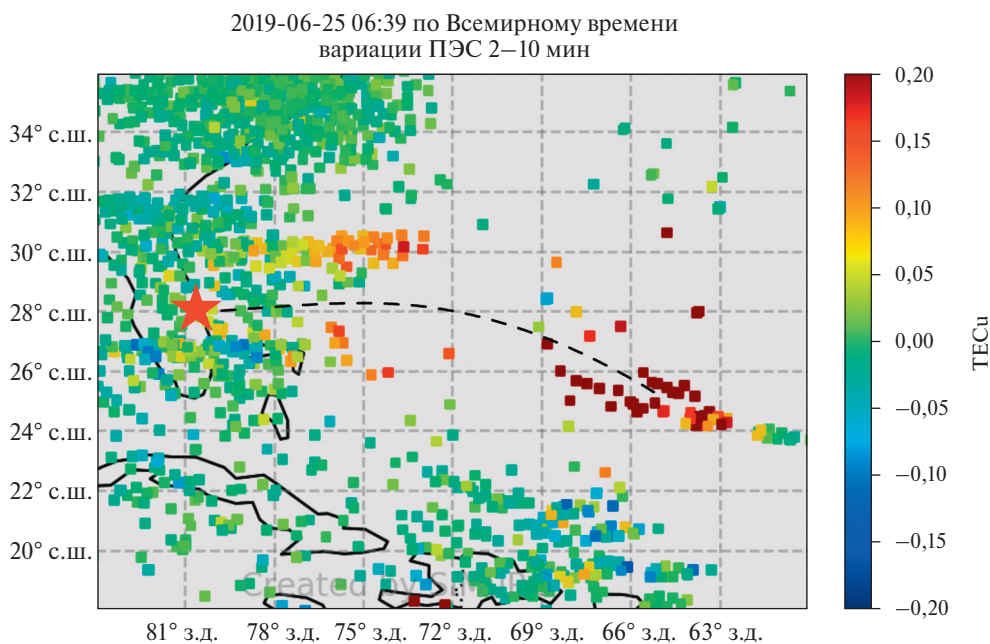


График вариаций ПЭС ионосферы во время запуска ракеты-носителя Falcon Heavy 25 июня 2019 г. (всего выведено на разные орбиты 24 спутника), вызвавший существенный рост электронной концентрации (красные точки). Место запуска – Космический центр им. Дж. Кеннеди (отмечено звездочкой). Пунктирная линия показывает примерную траекторию полета ракеты, построенную, исходя из наблюдаемых возмущений в ионосфере

дований. Ниже представлены примеры различных возмущений в ионосфере, которые могут быть исследованы на основе подобных карт.

Возмущения и волны от запусков ракет

GPS/ГЛОНАСС-исследования ионосферы в нашем институте начались фактически с изучения отклика ионосферы на запуски космических аппаратов. Было обнаружено, что при запуске ракет в полном электронном содержании возникает N-образное возмущение. Это N-образное возмущение образуется вследствие генерации ударной акустической волны при сверхзвуковом движении ракеты в атмосфере. Фактически, измеряя отклик ионосферы в разных регионах, можно отследить месторасположение источника зарегистрированного возмущения. Источник возмущений при запусках ракет был обнаружен на значительном удалении от места запуска (~500 км) и соотносился с местом входа ракеты в ионосферу.

Анализ данных плотных сетей приемников GPS/ГЛОНАСС показал наличие не только ударного возмущения,

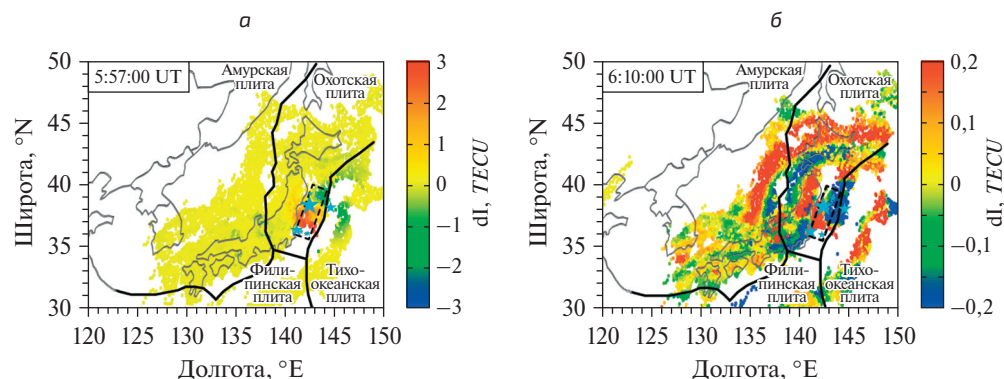
но и локального возмущения в ионосфере, связанного с выбросом ракетного топлива и изменения химического состава в ограниченной области ионосферы. Например, 25 июня 2019 г. измерен отклик ионосферы на запуск ракеты-носителя Falcon Heavy, произведенный компанией SpaceX. Запуск состоялся в 06:30 UT со стартовой площадки Космического центра им. Дж. Кеннеди. В 6:34 UT к юго-востоку от площадки возникло ионосферное возмущение, проявившееся в существенном росте электронной концентрации. Возмущение достигло максимума к 6:39 UT, через 9 мин после старта. Интересно, что регистрируя возмущения в ионосфере, возможно отследить примерную траекторию полета ракеты.

Волны от землетрясений

Первые исследования воздействия сейсмических процессов (землетрясений) на ионосферу также выявили наличие ударных акустических волн, аналогичным волнам, генерирующим при запуске ракет. Мощнейшие землетрясения позволили обнаружить весь спектр ионосферных возмущений, возник-

Графики вариаций ПЭС во время землетрясения Тохoku 11 марта 2011 г. в Японии:

а – в 5:57:00 UT, б – в 6:10:00 UT, в – в 6:46:30 UT. Черные жирные линии показывают области контакта литосферных плит. Пунктирный прямоугольник отмечает область максимальных подвижек земной коры. Эпицентры наиболее сильных толчков – голубые звездочки разного размера. По данным SIMuRG



кающих в ионосфере вследствие этих сейсмических событий. Одно из сильнейших землетрясений современности – Великое японское землетрясение Тохоку (Tohoku) – произошло в Японии 11 марта 2011 г. и имело магнитуду $M_w = 9,0$. Главному толчку землетрясения предшествовали несколько сильных форшоков ($M_w > 6,0$). После основного события была зарегистрирована сильная афтершоковая активность, включавшая 60 толчков с магнитудой $M_w > 6,0$ и три толчка с $M_w > 7,0$. Гряда Японских островов в результате землетрясения сместилась на восток относительно Тихоокеанской плиты, почти перпендикулярно линии контакта плит (черные жирные кривые).

В первые моменты землетрясения в ионосфере наблюдалось интенсивное возмущение, распространяющееся на юго-запад. Его скорость составила около 2–2,6 км/с. Следует отметить, что такие высокие скорости не характерны для внутренних процессов в самой атмосфере и ионосфере, зато достаточно хорошо соответствуют скорости поверхностной волны Релея, которая распространяется в земной коре во время землетрясения. Поверхностная волна на удалении от эпицентра землетрясения воздействует на атмосферу. Возмущение поднимается вверх и проявляется в ионосфере. Наибольшая

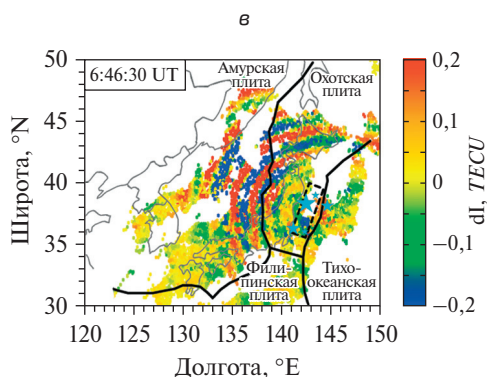
интенсивность возмущения наблюдалась в юго-западном направлении, где регистрировались максимальные подвижки земной коры.

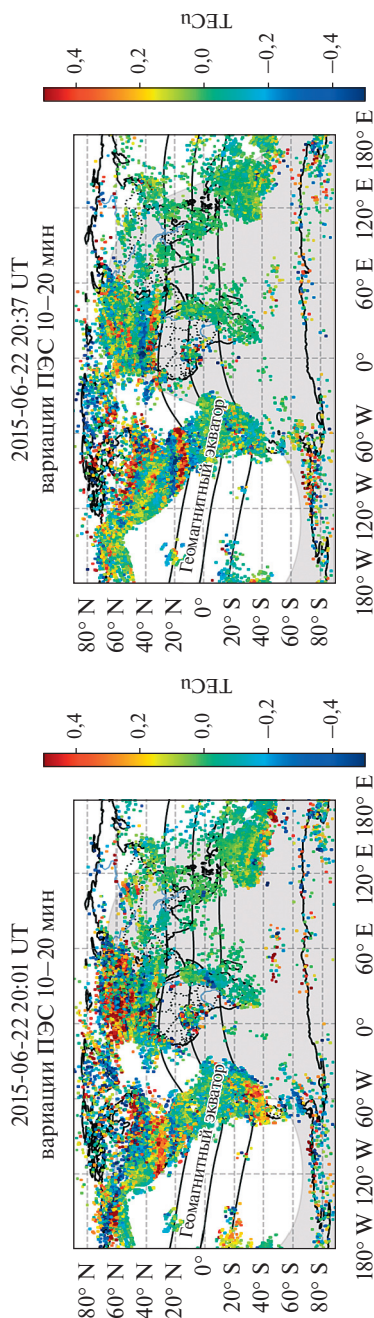
Помимо такого возмущения, связанного с воздействием сейсмических волн, быстро распространяющихся по поверхности Земли, в ионосфере наблюдались явно выраженные волновые возмущения, образующие расширяющееся от источника кольцо. Это уже атмосферные волны, которые породило землетрясение в момент толчка. Эти волны по своей природе похожи на те, которые образуются при броске камня в спокойный водоем. В период времени 05:50–06:25 UT можно было наблюдать крупномасштабные волновые возмущения с длиной волны около 600 км и скоростью 700–1000 м/с, а после 06:17 UT – среднемасштабные возмущения с длиной волны около 200 км и скоростью 150–300 м/с.

Ряд работ указывает на возможность выявления ионосферного отклика на цунами, которые часто сопровождают подводные землетрясения. Такая информация в будущем может служить дополнительным источником для раннего предупреждения этого опасного явления.

Волны во время магнитных бурь

Магнитные бури являются одним из наиболее значимых факторов, влияющих на состояние ионосферы. Во время магнитных бурь происходит расширение аврорального овала в сторону более низких широт. Авроральным овалом называют область в высоких широтах, в которой благодаря конфигурации магнитного поля высокоэнергичные частицы солнечного ветра могут достигать атмосферы Земли. Вследствие чего в этой области наблюдаются полярные сияния. В распределениях ПЭС авроральный овал выглядит как зона нерегулярных возмущений, где





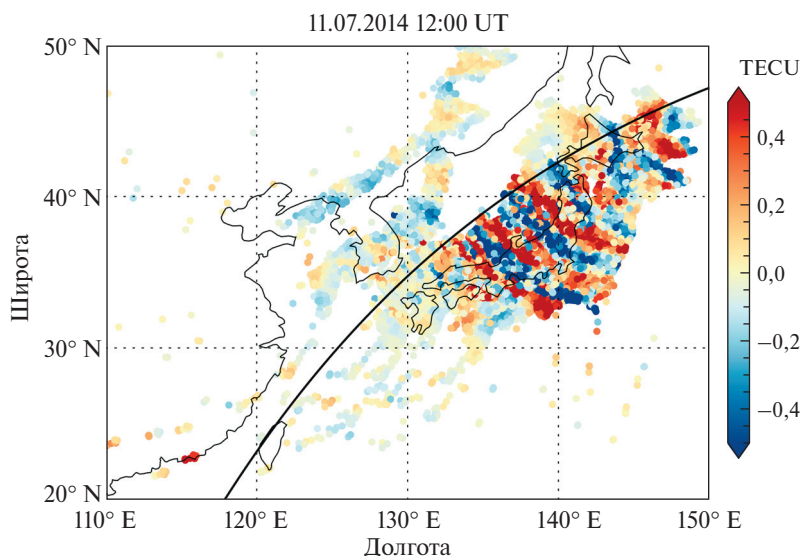
Графики вариаций ПЭС во время магнитной бури 22 июня 2015 г.: а – в 20:00 UT; б – в 21:00 UT. Хорошо видно, как в Европейско-Азиатском секторе волновые возмущения перемещаются в область средних широт. По данным SIMuRG

положительные (красные) вариации ПЭС быстро сменяют отрицательные (синие), не образуя какой-либо четкой пространственной структуры. Например, в период сильной магнитной бури, произошедшей 22 июня 2015 г., на Европейско-Азиатском секторе такие возмущения перемещаются в область средних широт. Двигаясь на средние широты, авроральный овал приводит к появлению здесь неоднородностей ионосферы, которые ухудшают работу технических радиосредств, использующих ионосферный канал.

В американском секторе во время этой бури в северном (и южном) полушарии в ионосфере возникла крупномасштабная волна, распространяющаяся в сторону экватора. Такие волны возникают, как правило, не очень часто и основным их источником является тот же авроральный овал. Интересно отметить, как волновой фронт выстраивается вдоль геомагнитной параллели.

Солнечный терминатор как источник волн

Границу освещенной и неосвещенной атмосферы называют солнечным терминатором. Солнечный терминатор также является источником ионосферных возмущений, поскольку на этой границе существует резкий скачок параметров атмосферы (температуры, давления, электронной концентрации), который к тому же движется. Измерения GPS/ГЛОНАСС позволили обнаружить, что при движении солнечного терминатора в ионосфере возникают волны. Например, среднемасштабные волновые возмущения с длиной волны порядка 100 км образуются при движении солнечного терминатора. Эти волны появляются в ионосфере регулярно день-от-дня. Интересно отметить, что такие возмущения могут возникать и раньше времени прохождения солнечного терминатора. Такое проис-



Реакция ионосферы на прохождение солнечного терминатора. Цветом точек показана интенсивность вариаций ПЭС. После прохождения солнечного терминатора в ионосфере отчетливо наблюдается волновая структура. Положение солнечного терминатора в ионосфере на высоте 200 км показано жирной черной линией. Рисунок получен по данным плотной сети приемных станций в Японии. По данным SIMuRG

ходит в том случае, когда в точке в другом полушарии, которая связана с точкой наблюдения по магнитному полю, солнечный терминатор проходит раньше по времени, чем в точке наблюдения. Тогда возмущение по магнитному полю передается из одного полушария в другое. В этом случае в полной мере проявляется взаимосвязь атмосферы, ионосферы и магнитосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы не ставили перед собой задачи показать абсолютно все явления в ионосфере, которые могут быть исследованы с помощью GPS/ГЛОНАСС-зондирования. Статья, скорее, является призывом более полно использовать такие данные для различного рода исследований. Следует отметить, что как в России, так и за рубежом – существует большое количество научных групп,

занимающихся изучением ионосферы на основе данных GPS/ГЛОНАСС (и других систем). Это, в свою очередь, указывает на эффективность такого инструмента.

Из интересных направлений развития хотелось бы отметить появившиеся в последние годы работы по использованию смартфонов для исследования ионосферы. Невозможно вообразить тот объем данных, который в будущем могут предоставить миллиарды пользователей, у которых стоит чип GPS/ГЛОНАСС.

В работе использовались результаты, полученные коллективом авторов в ИСЗФ СО РАН и ИКИР ДВО РАН, сформированным профессором Э.Л. Афраймовичем (12.03.1940–08.11.2009). Для обработки данных для настоящей статьи использовался проект SIMuRG (<https://simurg.iszf.irk.ru/>), создаваемый при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-20005).

ТИМУР МАГОМЕТОВИЧ ЭНЕЕВ (к 95-летию со дня рождения)

БОРОВИН Геннадий Константинович,

доктор физико-математических наук

ГОЛУБЕВ Юрий Филиппович,

доктор физико-математических наук

ЕФИМОВ Георгий Борисович,

кандидат физико-математических наук

КОЗЛОВ Николай Николаевич,

доктор физико-математических наук

ТУЧИН АНДРЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ,

доктор физико-математических наук

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

DOI: 10.7868/50044394820040076

Тимур Магометович Энеев родился 23 сентября 1924 г. в городе Грозный, скончался 8 сентября 2019 г. в Москве, не дожив две недели до своего 95-летнего юбилея.

Жизненный путь Тимура Магометовича, судьба его семьи – образец гармоничного сочетания традиций и талантов народов нашей страны. Его отец, Магомет Алиевич Энеев, балкарец, родился в горах Балкарии, вблизи Эльбруса. Он был блестяще образован: свободно владел несколькими языками, европейскими и восточными, получил духовное образование в Стамбуле. Себя всегда называл народным учителем. Вдохновился идеями равенства, принял активное участие в революционном движении на Кавказе, был среди организаторов Горской республики, объединившей народы Северного Кавказа, имел среди них большой авторитет. Это был человек



Член-корреспондент
АН СССР Тимур Магометович
Энеев. 1984 г.

высокой культуры, гуманитарной и мусульманской, в годы революции стал видным деятелем культурного и государственного строительства народов Северного Кавказа. Трагически погиб в 1928 г. Его жена, Евгения Петровна, поехала в Москву, где в одной из приемных ее случайно встретил А.И. Микоян, хорошо знавший М.А. Энеева по Кавказу. Он помог устроиться ей в Москве. Евгения Петровна вырастила сына и дочь, передала им память об отце¹.

В школе Тимур Энеев увлекается астрономией, идеей полета в космос, участие в освоении космоса становится мечтой всей его жизни. Началась война, он рвется на фронт, но не попадает из-за возраста. В эвакуации,

¹Бегиева-Кучемезова Р. Свет звезды и свечи. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2015. 192 с. (<https://keldysh.ru/e-biblio/eneev/>)

на военном заводе, его правая рука попала в станок и, после начавшейся гангрены, была ампутирована. «Так мне была сохранена жизнь», – говорил он позже: при его темпераменте он на фронте не уцелел бы.

В 1943 г. Т.М. Энеев поступил на механико-математический факультет МГУ и стал принимать участие в работе семинара А.А. Космодемьянского «Механика тел с переменной массой», на котором изучалась механика ракетного полета. Он создает кружок механики космического полета (вместе с В.А. Егоровым), работающий до сих пор.

Тимур Магометович в 1948 г. окончил механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. С 1950 г. работал младшим научным сотрудником в Отделе механики Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР (МИАН), который вошел в созданное в 1953 г. М.В. Келдышем Отделение прикладной математики АН СССР (ныне Институт прикладной математики (ИПМ) им. М.В. Келдыша РАН). Основные научные вехи: в 1953–1967 гг. – младший и старший научный сотрудник ОПМ МИАН, с 1967 г. – заведующий сектором, главный научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, доктор физико-математических наук (1959), член-корреспондент АН СССР (1968), академик РАН (1992). Основные направления научной деятельности Т.М. Энеева – динамика полета и управление движением ракет и космических аппаратов (КА), моделирование динамики сложных дискретных систем в задачах космологии и биологии.

Вся деятельность Тимура Магометовича на протяжении свыше 65 лет была связана с ИПМ и его пятым отделом, в котором, параллельно с ОКБ-1 (ныне – РКК «Энергия» им. С.П. Королёва) и другими организациями, рассчитывались траектории первых полетов ИСЗ, полетов к Луне, разрабатыва-



*Студент механико-математического факультета МГУ Тимур Энеев.
На заднем плане здание МГУ и памятник
М.В. Ломоносову. Конец 1940-х годов*

лась динамика космических полетов. Т.М. Энеев внес выдающийся вклад в создание основ теоретической и прикладной космонавтики.

Т.М. Энеев обладал удивительным даром в критический момент исследования какой-либо проблемы или разработки проекта «выдать» идею или даже способ ее решения. Подтверждением этому может служить краткий список его основных научных достижений:

- постановка и решение задачи оптимизации активного участка ракетной траектории;
- исследование вековых возмущений орбит ИСЗ;
- определение времени существования спутника, испытывающего аэродинамическое торможение;
- постановка и практическое решение задачи определения параметров



Полет Ю.А. Гагарина 12 апреля 1961 г.: старт ракеты-носителя «Восток», космонавт в скафандре перед стартом, траектория полета и спускаемый аппарат корабля «Восток» в музее РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. Коллаж

движения КА по данным траекторных измерений;

- исследование динамики неуправляемого спуска КА сферической формы в атмосфере Земли, имевшее решающее значение при выборе конструкции космического корабля «Восток» для полета первого космонавта Ю.А. Гагарина;

- разработка эффективного способа выведения КА на траекторию перелета к планетам с орбиты низколетящего ИСЗ, применяемого доныне;

- разработка метода транспортирующей траектории для расчетов межпланетных космических полетов с двигателями малой тяги;

- разработка теории автономной навигации;

- исследование проблемы полетов к малым телам Солнечной системы, в том числе с использованием двигателей малой тяги;

- создание нового метода исследования динамики больших сложных систем и применение в задачах астрофизики, космогонии и биологии.

За этими строками таится яркая, порой полная драматизма история работы мысли Тимура Магомедовича, обеспечившая многие достижения отечественной космонавтики. Ниже лишь некоторые подробности.

Задача об оптимальном управлении ориентацией оси ракеты. В 1940-х годах в МИАН под руководством М.В. Келдыша

начались исследования по созданию методов расчета баллистики полета и определения наилучших режимов управления полетом жидкостными ракетами. Важную роль в развитии отечественной ракетодинамики сыграли проведенные Т.М. Энеевым, Д.Е. Охочимским² и их коллегами исследования оптимальных режимов управления ракетами. Некоторая их часть, посвященная поиску оптимальной траектории выведения будущего первого искусственного спутника Земли³, была опубликована в сентябре 1957 г., накануне запуска первого искусственного спутника Земли. Часть других, не менее важных работ, осталась в отчетах ОПМ

²Дмитрий Евгеньевич Охочимский (1921–2005) – академик РАН, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, ученый в области математики и механики, создатель научной школы в области динамики космического полета, автор фундаментальных трудов в области прикладной небесной механики, робототехники и мехатроники; с 1949 г. работал в МИАН (ИПМ) в отделе М.В. Келдыша. В 1946 г. опубликовал статью «К теории движения ракет», посвященную оптимизации полета ракеты (Прикладная математика и механика, 1946, Т. 10. Вып. 2. С. 251–272).

³Охочимский Д.Е., Энеев Т.М. Некоторые вариационные задачи, связанные с запуском искусственного спутника Земли // Успехи физических наук. 1957. Т. 63. Вып. 1а. С. 5–32.

МИАН СССР или была издана в томе избранных трудов М.В. Келдыша⁴.

Известно, что траекторные задачи ракетодинамики относятся к классу вырожденных задач вариационного исчисления. Это связано с тем, что искомые функции управления полетом ракет (углы направления действия тяги ракетного двигателя, режимы расхода топлива и др.) физически не содержат членов, зависящих от траектории, и в выражениях оптимизируемого функционала отсутствуют производные искомых функций. А это приводит к вырождению дифференциальных уравнений Эйлера, описывающих решение классической вариационной задачи. Вместо дифференциального уравнения возникают некоторые конечные зависимости параметров задачи без производных. Отсутствие дифференциального уравнения приводит к отсутствию свободных постоянных в выражениях искомой траектории, и в результате не удается удовлетворить требуемым краевым условиям движения.

В 1951 г. Т.М. Энеевым была исследована общая задача о выборе оптимального программного управления положением оси составной ракеты, решение которой легло впоследствии в основу практически всех расчетов по выбору программного управления при выведении спутника на орбиту ИСЗ. Используя закон управления по тангажу (угловое движение КА относительно горизонтальной поперечной оси инерции), полученный при решении этой задачи, А.К. Платонов и Т.М. Энеев в 1955–1956 гг. провели серию расчетов

⁴ Келдыш М.В. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988; см также: Прикладная механика и управление движением: сб. статей / М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с. (<http://keldysh.ru/memory/okhotsimsky>).

М. В. КЕЛДЫШ

Избранные труды

РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА И КОСМОНАВТИКА

ОТВЕТСТВЕННЫЕ РЕДАКТОРЫ

академик
В. С. АВДЯЧЕНСКИЙ
член-корреспондент АН СССР
Т. М. ЭНДЕЕВ



МОСКВА «НАУКА» 1988

Титул монографии М.В. Келдыша
«Избранные труды. Ракетная техника
и космонавтика». М.: Наука, 1988 г.

по выбору оптимального программного управления ракетой по тангажу при выведении искусственного спутника Земли на орбиту. На основании проведенных расчетов было показано, что на безатмосферном участке выведения спутника (на основной части траектории выведения) оптимальная программа управления по тангажу может быть представлена линейной функцией по времени. Это было впоследствии использовано при расчете практически всех возможных программ управления выведением спутника.

Тимур Магометович варьировал направление тяги ракеты так, чтобы получить на заданной высоте максимальную горизонтальную скорость. Заметим, что стандартная постановка задач ракетодинамики того времени была связана с поиском траекторий выведения ракет



Полет ракеты-носителя «Спутник» с первым ИСЗ. Рисунок

на максимальную высоту с горизонтальной скоростью в конце участка работы ракетного двигателя. Ученый удачно применил принцип дополнительности условных задач вариационного исчисления, сведя задачу к более простому исследованию вариаций скорости при изопериметрическом (интегральном) условии высоты. При этом также искались оптимальные начальный угол тяги, горизонтальная протяженность полета и, возможно, время полета. Задача решалась в плоской постановке в условиях плоско-параллельного (для коротких траекторий разгона) или центрального поля сил тяжести. Основным результатом является линейная или дробно-линейная зависимость от времени тангенса оптимального угла тангажа ракеты в процессе разгона.

В 1956 г. Т.М. Энеев и Д.Е. Охоцимский, опираясь на методы вариационного исчисления для вырожденного случая, исследовали задачу о выборе оптимального режима расхода топлива при выведении ракеты-носителя на орбиту ИСЗ.

Эволюция орбиты ИСЗ в верхних слоях атмосферы и оценки времени его жизни. Перед запуском первого ИСЗ были опасения, что аэродинамическое торможение на его невысокой орбите может привести к тому, что спутник упадет на Землю, даже не совершив и одного оборота. Попытки получить точное значение «времени жизни» спутника с помощью тогдашней БЭСМ оказались трудно реализуемыми ввиду значительного диапазона значений действующих сил и достижимой точности вычислений, ограниченной (при представлении чисел с плавающей запятой) 33-мя двоичными разрядами мантиссы БЭСМ.

Эллиптический характер возможной орбиты первого советского ИСЗ приводил к слабым импульсным тормозным эффектам при его сближении с Землей в районе перигея орбиты. Эти слабые ускорения торможения были малым параметром, значительно увеличивая время интегрирования, что приводило к росту ошибок округления. Кроме этого, при аддитивном добавлении ускорений от аэродинамических сил к действующим гравитационным ускорениям первые либо оказывались за

Параметры орбиты ИСЗ (искусственного спутника Земли)

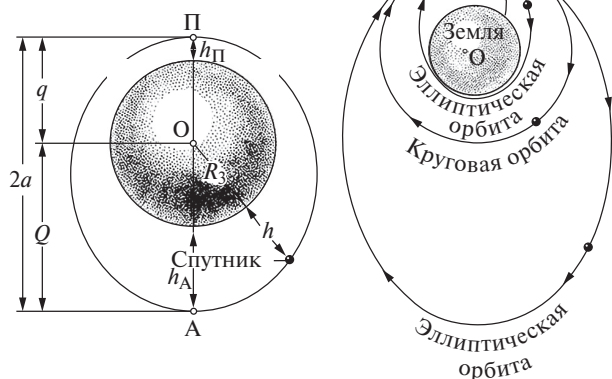
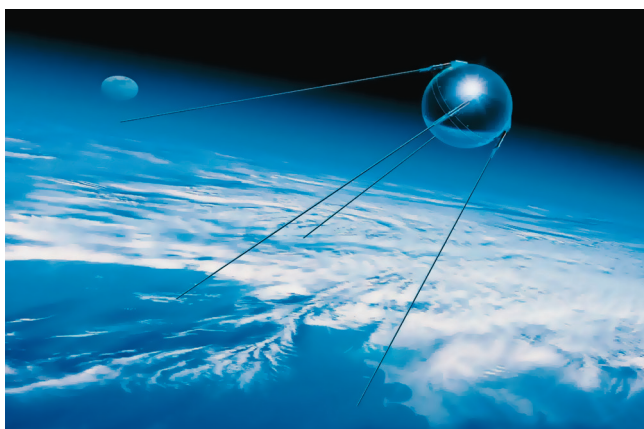


Схема эллиптической орбиты первого советского ИСЗ

разрядной сеткой машины, либо теряли почти все свои значащие разряды. Нужно было придумать нечто новое в области численных расчетов на ЭВМ – найти способ численного интегрирования системы уравнений колебательного движения, в которой изменение ключевых слагаемых правых частей вдоль колебания было менее точности представления действительных чисел.

Эта задача была решена Д.Е. Охотимским, Т.М. Энеевым и Г.П. Таратыновой. При обсуждении проблемы Тимур Магомедович предложил идею, которую Дмитрий Евгеньевич сразу оценил. Т.М. Энеев предложил алгоритм, который и был реализован Г.П. Таратыновой как основной метод численных расчетов не только времени жизни спутников (опубликован в специальном номере журнала «Успехи физических наук», 1957, т. 63, вып. 1а), но и вообще длительных орбитальных движений с малыми возмущениями⁵. Решение проблемы заключалось в том, что при исследовании эволюции амплитуды колебательного движения в ряде случаев можно пренебречь точным знанием закона изменения его фазы и для построения дифференциального уравнения, описывающего эту эволюцию, воспользоваться методом усреднения, выполняя усреднение численно. Эта идея была реализована в виде двухциклового метода. Внешний цикл состоял в численном интегрировании методом невысокого порядка с большим шагом усредненных уравнений движения спутника в оскулирующих элементах. Внутренний цикл состоял в вычис-



Первый ИСЗ на околоземной орбите. Рисунок

лении правых частей этих уравнений в подшаговых точках и в каждой такой точке сводился к интегрированию исходных уравнений на одном обороте спутника методом высокого порядка.

Проведенные по этой методике расчеты позволили построить в безразмерных параметрах графики времени жизни для различных орбит спутников Земли. Анализ полученного решения показал, что увеличение времени жизни спутника можно достигнуть путем подъема высоты апогея его орбиты, увеличивая скорость в конце разгона и не изменяя программу выведения. Это было использовано при запуске 4 октября 1957 г. первого советского ИСЗ (ЗиВ, 2007, № 5), в подготовке которого активно участвовали Д.Е. Охотимский и Т.М. Энеев.

Исследование возможностей баллистического спуска КА с орбиты ИСЗ для безопасного возвращения космонавта на Землю. В 1953 г., за три года до запуска первого спутника и за 7 лет до полета Ю.А. Гагарина, Т.М. Энеев решил разобраться с вопросом: «Возможно ли спустить с орбиты искусственного спутника Земли космонавта? Не сторгит ли он, и не раздавит ли его перегрузка при торможении

⁵ Таратынова Г.П. Сб. «Искусственные спутники Земли», 1960. Вып. 4.



А.А. Леонов, А.К. Соколов «Возвращение».
Картина 1969 г.

в атмосфере?». Этот вопрос в то время был предметом обсуждения, но какие-либо надежные соображения и серьезные оценки ответа на эти вопросы отсутствовали. Большинство специалистов считали, что безопасный спуск обеспечит лишь крылатый аппарат. Движение с подъемной силой было привлекательно по многим причинам (заведомо можно было найти решение, оно было более знакомо и т.п.). Но Тимур Магометович взялся за более сложную задачу оценки возможности использования баллистического спуска, как технически более простого в реализации. Стояла также проблема выбора формы спускаемого аппарата. В результате исследований было решено просчитать самой простой спускаемый аппарат – сферической формы. Именно в этот момент, по-видимому, и родился «шарик Гагарина» (в будущем – спускаемый аппарат космического корабля

«Восток»; ЗиВ, 2001, № 2; 2011, № 2). Проблема расчета аэродинамических сил для сферического тела на сверхзвуковых скоростях во всем диапазоне высот траектории спуска в то время еще не была разработана. Имелись некоторые данные о движении со скоростями в пределах 3М (число Маха – это истинная скорость в потоке вещества, то есть скорость, с которой воздух обтекает тело, деленная на скорость звука в атмосфере) на высотах около 20 км. Здесь же речь шла о значительно больших скоростях движения на высотах, начиная от самых верхних слоев атмосферы. Для надежного определения максимальных перегрузок торможения Тимур Магометович выбрал значения в самых худших предположениях.

Следующей задачей была необходимость построить модель тепловых явлений при входе спускаемого аппарата космического корабля в атмосферу Земли. Здесь следовало учесть три процесса: нагрева спускаемого аппарата вследствие трения об атмосферу, теплопередачи внутрь спускаемого аппарата с учетом теплоизоляционных свойств различных материалов и горения оболочки «шарика» и уноса части тепла элементами ее плавления. Если температуры нагрева можно было с запасом просчитать, исходя из изменения энергии спускаемого аппарата в процессе торможения, то параметры теплопередачи внутрь «шарика» и уноса раскаленного вещества требовали специальных расчетов. В результате Т.М. Энеев, после теоретического исследования, предложил использовать баллистический спуск корабля с орбиты ИСЗ на Землю как средство безопасного возвращения космонавта из орбитального полета. Ученый установил, что максимальная перегрузка при таком спуске не превосходит десятикратной величины, причем перегрузки выше пятикратной длятся не более

одной минуты. Оценивалась также величина нагрева корпуса спускаемого аппарата вследствие теплопередачи от газа к стенке в турбулентном пограничном слое обтекающего «шарик» высокоскоростного потока воздуха. Результаты, полученные Т.М. Энеевым, были настолько смелыми, что М.В. Келдыш в них сомневался, пока их не перепроверили смежники. Эти исследования имели решающее значение при выборе конструкции аппарата для первого полета человека в космос, и он был реализован Ю.А. Гагариным.

Разработка методов определения траектории КА по данным измерений.

С запуском первого ИСЗ возникла задача определения параметров его орбиты по данным траекторных измерений. Теория определения орбит небесных тел по данным наблюдений была уже разработана в астрономии, однако астрономические методы оказались малопригодными для определения орбит искусственных небесных тел. Потребовалась их существенная переработка и развитие новых методов, учитывающих специфику траекторий КА и использующих возможности современных средств наблюдений и вычислительной техники. Работы по созданию методов определения орбит искусственных небесных тел проводились в ИПМ АН СССР под руководством Т.М. Энеева. В результате он решил задачу определения параметров траектории КА и прогнозирования его движения по данным траекторных измерений заданного состава и известной точности, проведенных в заданные моменты времени при известных значениях астрономических постоянных и эфемерид небесных тел. С использованием статистического подхода была разработана вычислительная схема решения этой задачи, построены математические модели движения ИСЗ и КА, совершающего перелет к Луне или к планете, разработаны математические модели процесса радиотехнических



*А.К. Платонов, Т.М. Энеев, Д.Е. Охоцимский.
ИПМ, 1960-е годы*

измерений траектории и ряд других. Разработанные им методы обеспечили надежное и эффективное слежение за полетом первых ИСЗ и заложили основы создания автоматизированных комплексов управления полетами КА разного назначения – автоматических ИСЗ и КА, пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций, межпланетных станций для полетов к Луне и планетам. Один из таких комплексов был создан в 1965 г. по инициативе М.В. Келдыша и С.П. Королёва в Баллистическом центре ИПМ АН СССР, который возглавил ученик Тимура Магомедовича – Эфраим Лазаревич Аким (ЗиВ, 2011, № 1)⁶.

М.В. Келдыш попросил Д.Е. Охоцимского и Т.М. Энеева попробовать ор-

⁶ Аким Э.Л. (1929–2010) – член корреспондент РАН, лауреат Ленинской премии, ученый в области космической баллистики, навигации космических аппаратов и планетологии, автор более 240 научных трудов, с 1953 г. работал в МИАН (ИПМ), с 1994 г. – заместитель директора по научной работе.



Т.М. Энеев и Э.Л. Аким. 1960-е годы

ганизовать обработку оптических наблюдений спутника с целью определения его орбиты на полученной тогда ОПМ ЭВМ «Стрела». Полная драматизма история этой первой в нашей стране машинной обработки траекторных наблюдений описана в статье⁷. Опыт этой обработки (с учетом опыта параллельных работ ОПМ в области баллистических ракет) практически лег в основу методик, используемых во всех современных отечественных баллистических центрах. В настоящее время многое из того опыта звучит как очевидное, но тогда это было не так. В этом достижение Тимура Магомедовича, о котором нельзя не упомянуть.

Вспоминает А.К. Платонов⁸: «Как оказалось, может быть, главная вычис-

лительная проблема в задачах определения траекторий возникает благодаря большой размерности пространства определяемых параметров. В этом первом опыте обработки оптических наблюдений первого и второго спутников в качестве искомым параметров были выбраны 18 коэффициентов, возникающих при квадратической аппроксимации зависимости от времени 6 оскулирующих элементов орбиты. Задача решалась методом наименьших квадратов. Зависимость измерений, выполненных при наблюдениях спутника, от искомым параметров – весьма нелинейная, поэтому их значения приходилось находить итеративно методом Гаусса–Ньютона, решая на каждой итерации систему так называемых нормальных уравнений, шаг за шагом приближаясь к точке минимума функционала в пространстве определяемых параметров. И конечно (теперь-то это понятно), в пространстве такой размерности сразу же возникла проблема «оврагов»! Все попытки спуститься к искомому решению после двух-трех достаточно хороших уменьшений функционала заканчивались, и мы переходили на медленный, практически незаметный почти пологий спуск, болтаясь у дна «оврага». При таком характере сходимости дожидаться конца процесса было практически невозможно! К чести Тимура Магомедовича он достаточно быстро объяснил причину этого явления – «овраг»! Но что было делать? Отказ от определения квадратичных уходов оскулирующих элементов, то есть – уменьшение размерности пространства определяемых параметров с 18 до 12, не изменил ситуацию. Тогда мы стали менять алгоритм решения и перепробовали массу (около десяти) разных методов логического управления сходимостью, но все было безрезультатно. Найти решение не удавалось. С грустным серд-

⁷Платонов А.К., Казакова Р.К. Первая машинная обработка траекторных измерений спутника Земли. Вестник РАН. Т. 72. № 9. С. 816–836.

⁸Платонов Александр Константинович (1931–2017) – доктор физико-математических наук, лауреат Ленинской премии, ученый-механик, с 1957 г. работал в ИПМ, член Ученого Совета Института, заведующий сектором № 3 отдела № 5, профессор базовой кафедры МФТИ в ИПМ. Член бюро Научного совета РАН по робототехнике и автоматизированному производству.

цем участники работы разошлись на очередное празднование 7 ноября, но уже 8 ноября 1957 г. Тимур Магометович радостно сообщил, что он, по-видимому, решил проблему «оврагов». Т.М. Энееву пришла в голову блестящая идея «метода параболического спуска». Этот метод, ставший теперь классическим, и обеспечивший возможность машинной обработки измерений в каждом из баллистических центров, поражает своей красотой. Итак, Т.М. Энеев в нужный момент придумал способ борьбы с «оврагами». Позже выяснилось, что ранее – в 1948 г., Л.В. Канторович⁹ также предложил очень похожее описание развития метода Ньютона, но без привязки к способу наименьших квадратов. Так родился метод, обеспечивший надежное решение задач машинной обработки траекторных измерений, теперь широко используемый. Позднее (в 1972 г.) американец А. Брайсон на Конгрессе по теоретической механике рассказал об аналогичном методе, открытом им».

Создание метода определения точек приземления спускаемого КА. После запуска первого ИСЗ начались работы по созданию орбитального КА для полета человека. Был решен большой комплекс задач, связанных с выведением орбитального обитаемого аппарата, безопасным пребыванием его на орбите, динамикой движения



Космонавт Г.М. Гречко, Т.М. Энеев и Р.К. Казакова. 2000-е годы

относительно его центра масс и другими задачами. Т.М. Энеевым с коллегами была разработана методика оценки рассеивания точек приземления спускаемого аппарата (СА) на местности. С ее помощью был проведен анализ точности его приземления в заданном районе. Был выполнен целый ряд других исследований по динамике и управлению полетом пилотируемого космического корабля, например, исследования по выбору оптимальных условий схода с орбиты, обеспечивавших использование простых и надежных солнечных датчиков ориентации и т.д. Исследования по динамике явились важной частью комплекса работ, обеспечивших первый космический полет человека вокруг Земли.

Вклад Т.М. Энеева в теорию и практику полетов к планетам. Важный вклад внес Т.М. Энеев в теорию и практику полетов к планетам Солнечной системы. При проектировании полетов к Луне, Марсу и Венере выявились противоречия между условиями энергетической оптимальности межпланетной орбиты перелета

⁹ Леонид Витальевич Канторович (1912–1986) – академик АН СССР, ученый-математик и экономист, один из создателей линейного программирования, лауреат Нобелевской премии по экономике 1975 г.

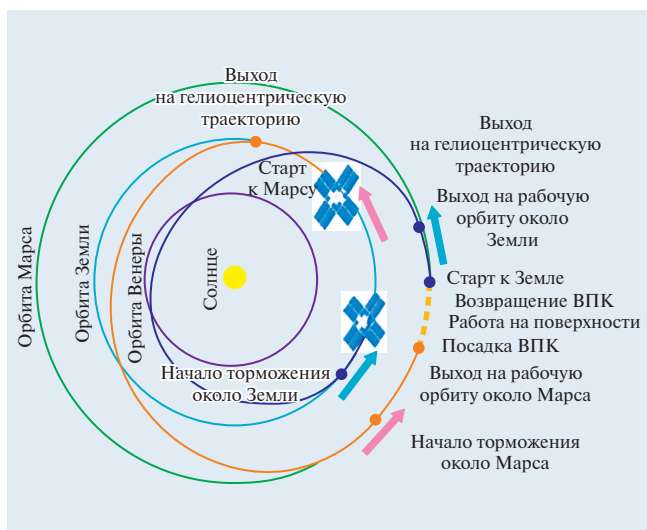


Схема траекторий полетов автоматических межпланетных станций к Венере и Марсу

и условиями старта ракеты-носителя с территории СССР. Энеев предложил использовать для разгона межпланетных станций активные участки, разделенные паузой на незамкнутой промежуточной орбите ИСЗ. При этом пауза должна подбираться таким образом, чтобы повторное включение двигателей и окончательный разгон КА происходили в низких широтах Земли. Использование такого способа выведения, ставшего впоследствии универсальным и получившего название «Звездочка», существенно облегчило решение ряда баллистических проблем межпланетных перелетов, расширив оптимальные навигационные интервалы возможных дат старта и улучшив условия слежения за КА.

Разработка схемы управления межпланетным полетом КА. Под руководством Т.М. Энеева была разработана схема операций максимально точного управления межпланетным полетом КА при минимальном расходе рабочего тела. При проектировании

полетов к Марсу и Венере задача состояла в разработке принципов точного наведения КА на планету-цель (в том числе и для траекторий с ее облетом). Из-за ошибок в кинематических параметрах в конце участка выведения ракеты-носителя промах вблизи планеты-цели мог достигать сотен тысяч километров. В связи с этим возникла необходимость активного управления полетом КА на всей траектории от

Земли до планеты-цели. Схема управления полетом КА содержала две главные операции, выполняемые последовательно в ходе полета несколько раз: определение фактической траектории полета КА путем обработки данных траекторных измерений и определении корректирующего импульса, исправляющего нужным образом траекторию.

В практике космических полетов траекторные измерения представлены радиоизмерениями наклонной дальности и радиальной скорости, использующими эффект Доплера. Т.М. Энеев с сотрудниками предложил завязать траекторию, привлекая знание закона движения КА относительно земного пункта наблюдения путем обработки наклонной дальности и (или) радиальной скорости, измеренных на достаточно длительном промежутке времени хотя бы с одного измерительного пункта. Оказалось, что при достаточно точных и длительных измерениях можно с высокой точностью определять траекторию движения КА при любых его удалениях от Земли. Режим измерений при полете к дальним планетам Солнечной системы стал формироваться из двух

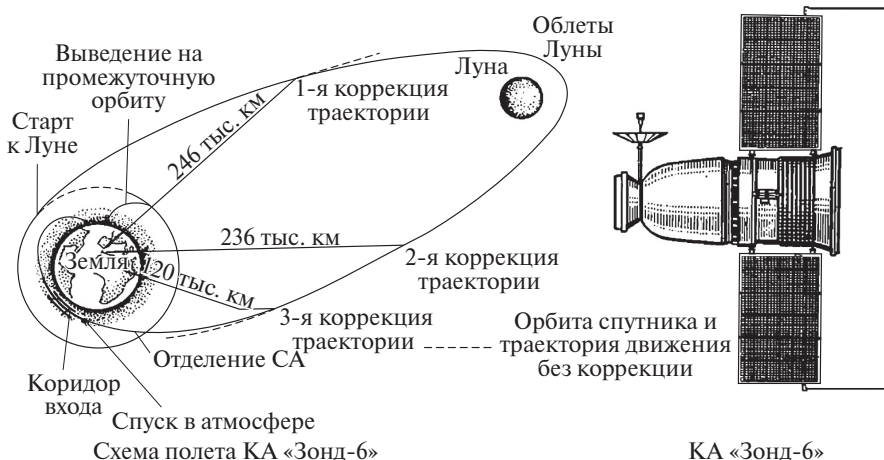


Схема траектории полета к Луне 10–17 ноября 1968 г. беспилотного космического корабля «Зонд-6 – прототипа лунного корабля «Союз 7К-Л1», по программе облета Луны экипажем из двух человек

основных компонент – режима измерений на околоземном участке полета с высоким темпом измерений с нескольких пунктов и режима межпланетного участка с медленным темпом измерений и крупными массивами данных на длительных временных интервалах. Появился и третий компонент – режим измерений на участке вблизи планеты-цели, который также имел свои особенности.

Т.М. Энеев разработал теорию автономной навигации КА на орбите. Для пилотируемого варианта беспилотного космического корабля «Зонд» была разработана система автономной навигации «Альфа» с использованием оптических измерений с помощью секстанта и отечественной БЦВМ «Салют-1». Навигационная система «Альфа» использовалась в 1968–1970 гг. в полетах с облетом Луны КА «Зонд-5» – «Зонд-8» (ЗиВ, 2019, № 5).

Исследования эволюции протопланетных систем и процесса образования планет Солнечной системы. В 1970-х годах Т.М. Энеев совмест-

но с Н.Н. Козловым предложил модель формирования Солнечной системы¹⁰. Была исследована эволюция протопланетных систем и модели процесса аккумуляции применительно к объяснению образования планет. Новая модель образования Солнечной системы, аккумуляции планет из большого числа частиц, первоначально движущихся по околокруговым орбитам, позволила объяснить ряд эффектов при образовании планет и систем их спутников, в том числе закон Тициуса–Бодде для планетных расстояний от Солнца и собственное вращение планет, механизм которого безуспешно привлекал усилия многих классиков.

Разработка методов и расчет траекторий межпланетных полетов КА с малой тягой. В начале 1960-х годов

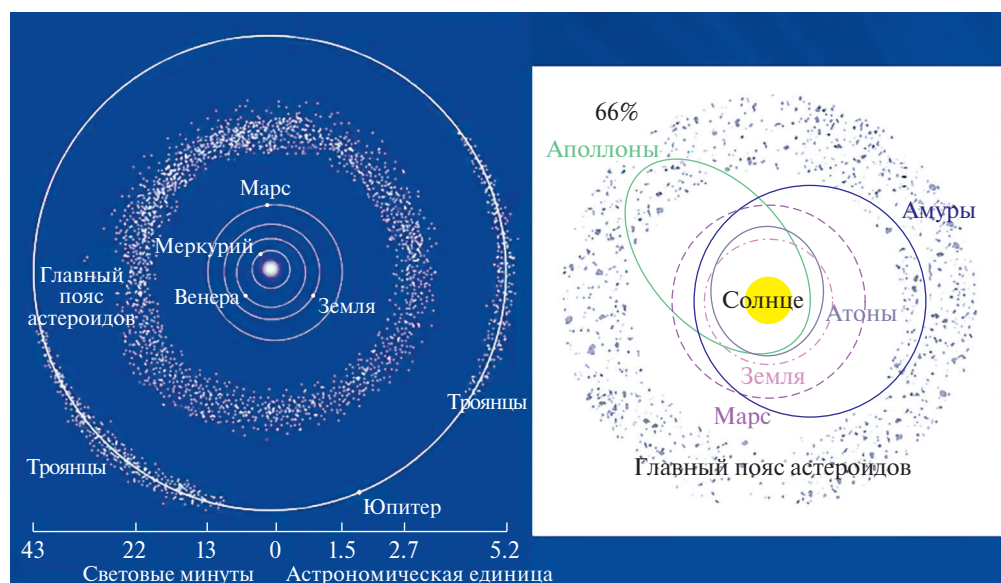
¹⁰ Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем. I. Численные эксперименты. *Астрономический вестник*. 1981, Т. 15, № 2, С. 80–94. II. Вращение планет и связь с теорией гравитационной неустойчивости. *Астрономический вестник*. 1981, Т. 15, № 3, С. 131–141.

Т.М. Энеев предложил метод «транспортирующей траектории» для первых расчетов межпланетных космических полетов с двигателями малой тяги (МТ), плазменными и ионными. В 1990-е годы Тимур Магомедович поставил задачу о доставке образца грунта с малых тел Солнечной системы для «получения сведений, позволяющих понять происхождение Солнечной системы». Это могло бы дать новую информацию для представлений о веществе Земли. Важно, чтобы образцы относились к «реликтовому» веществу, сохранившему минеральный, химический и изотопный состав со времен формирования Солнечной системы. Образцы реликтового вещества из определенных поясов Солнечной системы могут содержать малые тела – астероиды Главного пояса и спутники планет, например, спутник Марса Фобос (ЗиВ, 2009, № 4). С начала 1980-х годов, когда полеты с двигателями малой тяги стали обретать реальные черты, Т.М. Энеев возглавил исследования траекторий полетов КА с малой тягой

с учетом реально существующих технических средств (двигателей и энергетических установок, солнечных батарей или ядерных космических установок). Были исследованы траектории полетов с двигателями малой тяги, плазменными к астероидам и возможностью забора с них грунта и доставки его к Земле.

Проблема астероидной опасности и миграции малых тел в окрестность Земли. К приложениям результатов моделирования формирования Солнечной системы относится и проблема астероидной безопасности Земли. В 1979 г. Т.М. Энеевым было предсказано существование астероидного пояса за Нептуном и высказано предположение, что Плутон является одним из тел этого пояса. При наблюдении этих тел, на пределе погрешности одно из них удалось обнаружить, но не удалось подтвердить это наблюдение. С тех пор открыто большое число астероидов пояса за Нептуном. Исследования по миграции малых тел в Солнечной системе Т.М. Энеева совместно с С.И. Ипато-

Схемы орбит астероидов, сближающихся с Землей



вым выявили возможный механизм «раскачки» орбит тел в этом поясе и миграции их в окрестность орбиты Земли вследствие возмущений от больших планет. Таким образом, было высказано предположение, что значительная часть астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ; ЗиВ, 2011, № 3), является мигрантами из удаленной области пояса Койпера. Тимур Магомедович сформулировал задачу возможного обнаружения популяции тел, представляющих опасность для Земли, и предложил схему их выявления с помощью средств космического базирования. В связи с проблемой «астероидной опасности» Т.М. Энеевым была предложена схема создания «оптического барьера» с помощью космических телескопов, размещенных на орбите Земли для обнаружения АСЗ и оценки их опасности.

Создание нового метода исследования больших сложных систем и его применение. В 1970-е годы Т.М. Энеевым (совместно с Н.Н. Козловым) был разработан новый метод моделирования динамики больших дискретных систем. Новый метод расчета динамики сложных дискретных систем отличается экономией числа операций при вычислениях $\approx N^{3/2}$, а не N^3 , как обычно в этих методах (N – число частиц, десятки и сотни тысяч). Экономность метода достигается отбором групп взаимодействующих частиц из общего их числа – для каждой области взаимодействия, на каждом его шаге. По просьбе астрофизиков метод применили в задаче эволюции галактик при их гравитационном взаимодействии. При моделировании в облаке из тысячи частиц, движущихся по почти круговым орбитам вокруг его ядра, при пролете другой галактики образовывались спиральные ветви. Они не лежат в исходной плоскости движения частиц, что невозможно при других ме-

ханизмах их образования. На материале расчетов был снят фильм (с экрана дисплея), имевший большой успех у ученых и у широкого зрителя: он стал заставкой телепередачи «Очевидное – невероятное».

Кроме применения метода к задаче астрофизики и модели формирования Солнечной системы, одним из приложений был анализ процессов структурообразования больших биологических молекул с помощью математического моделирования – и как отдельного явления, и как процесса зарождения структуры в целом. В модели, при образовании вторичной структуры (петель и стеблей), ее варианты выбираются по локальной оптимальности свободной энергии молекулы. Степень предсказания структуры оказывается на 20% лучше, чем при косвенных биохимических методах¹¹. Продолжая и развивая эти исследования, Энеев с коллегами исследовали свойства генетического кода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты научных работ Т.М. Энеева были отмечены многими наградами. Тимур Магомедович – лауреат Ленинской и Демидовской премий, награжден Орденом Ленина и другими орденами. Он был удостоен премии Ф.А. Цандера и золотой медали имени М.В. Келдыша Российской академии наук, его имя присвоено малой планете Солнечной системы № 5711.

Т.М. Энеев не только выдающийся ученый, мыслитель, но и гражданин нашего Отечества. Он активно откликался на проблемы становления науки, космонавтики, развития образо-

¹¹ Козлов Н.Н., Кузусев Е.И., Энеев Т.М. Компьютерный анализ процессов структурообразования нуклеиновых кислот. Математическое моделирование. 2013, Т. 25, № 4, с. 126–134.



Академик Т.М. Энеев.
2000-е годы



Дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт
Г.М. Гречко и Т.М. Энеев. 2000-е годы

вания и других вопросов, волнующих современное общество. Так, трудно переоценить его вклад в борьбу против проекта поворота северных рек на юг.

Тимур Магометович с юных лет был страстным энтузиастом космонавтики. Основал на мехмате МГУ кружок, семинар, существующий до сих пор. Увлечение это не редкое, не новое. В России оно имело место еще в конце XIX – начале XX века и прошло через весь XX век, известно под именем «русский космизм» – философское и культурное течение русского общества. Главное в нем – знание, что жизнь природы и человечества тесно связаны с космосом, Вселенной. Круг этого течения был широк: ученые – В.И. Вернадский, К.Э. Циолковский, А.Л. Чижевский, философы – В.С. Соловьёв, Н.А. Бердяев, из людей искусства А. Блок, В. Брюсов, Н. Рерих, А. Скрябин. Мысли и взгляды их созвучны были поискам в русском обществе рубежа XIX – XX веков, «вере» в науку, в результаты ее огромных успехов в мире и в России и другим духовным и общественным течениям.

Т.М. Энеева и его друзей в ИПМ можно отнести, вслед С.П. Королёву, к кругу «русских космистов» – энтузиастов космоса и его освоения. В молодости – «по Циолковскому»: в надежде (утопии), что контакт с космосом объединит человечество. Позже восприятия мечты у него стали углубляться, его мировоззрение – двигаться в направлении позиций Н.Ф. Фёдорова, к христианству¹². Об этом пути, пройденном Тимуром Магометовичем вместе с супругой Людмилой Фёдоровной, историком, рассказано их дочерью Натальей в книге Р. Бегиева-Кучемезова «Свет звезды и свечи»: «С конца 1960-х годов родители, находясь в светской среде, стали все больше говорить о Боге. Любимым чтением стал Достоевский: “Бесы” – аналогия с нигилистическим диссидентством,

¹² Тимур Магометович не был одинок в эволюции своих взглядов: среди его коллег можно назвать, например, академика АН СССР Б.В. Раушенбаха, профессора В.Г. Дёмина, члена-корреспондента АН СССР В.В. Белецкого, профессора М.Л. Лидова.

и “Братья Карамазовы” – образы старца Зосимы и Алеши Карамазова. Любимой пластинкой папы в это время стала запись “всенощного бдения” с Ф.И. Шаляпиным... Мне представляется ценным, что родители пришли к вере самостоятельно, каждый своим путем, но в согласии друг с другом – выбор сердца, согласно с выводом разума. Сыграли роль и папины занятия космогонией».



Т.М. Эннеев с дочерью Натальей. 2000-е годы

В духовную область Тимур Магомедович входил, как и во все, за что брался, основательно. Стал соруководителем семинара «Наука и религия» в Православном Свято-Тихоновском гуманитарном университете, в 1990-е годы помогал этому вузу «встать на ноги». Во время тяжелой болезни он не жаловался, удивляя своим мужеством и терпением.

Научные методы, развитые Т.М. Эннеевым, составляют золотой фонд отечественной космодинамики и активно используются при планировании и осуществлении самых смелых российских проектов по исследованию космического пространства.



А вы отправили обязательный экземпляр?

Издательство «Наука» предлагает организациям
и независимым издателям услугу по отправке
Обязательного Электронного Экземпляра
в Российскую государственную библиотеку
и Российскую книжную палату

При размещении научных, научно-популярных книг и журналов в Электронной библиотечной системе
Издательства «Наука» (libnauka.ru) данную услугу мы предоставляем бесплатно
Задать вопрос и узнать о стоимости услуги вы можете по адресу eee@naukaran.com

ЧЕЛОВЕК ВСЕЛЕННОЙ. ПАМЯТИ БОРИСА ПШЕНИЧНЕРА

РОМЕЙКО Виталий Александрович,

Центр астрономического и космического образования ГБПОУ «Воробьевы горы»

DOI: 10.7868/S0044394820040088



Б.Г. Пшеничнер. 1953 г.

30 марта 2020 г. не стало моего учителя и друга Бориса Григорьевича Пшеничнера – человека Вселенной, яркого педагога, одного из создателей дополнительного аэрокосмического образования детей и молодежи в России, создателя и первого руководителя Отдела астрономии и космонавтики Московского городского Дворца пионеров и школьников (ЗиВ, 2014, № 2).

Отдел астрономии и космонавтики, которым он руководил более сорока лет, превратился в уникальный центр дополнительного астрономического образования детей. Благодаря своему таланту организатора Борис Григорьевич сумел создать высоко творческий коллектив воспитанников, педагогов и ученых. Он создал свой уникальный мир – Вселенную Пшеничнера.

Начало педагогической деятельности молодого учителя пришлось на далекий 1954 г., когда Борис Григорьевич стал старшим пионервожатым, а затем учителем географии и астрономии в московской школе № 268.

Затем с 1958 по 1962 г. – Московский планетарий с его традиционной школой лекторской работы. Именно здесь были заложены основные навыки деятельности популяризатора, вырабатывалось умение доходчиво и интересно рассказать о строении Вселенной, о рождающейся отечественной космонавтике.

В период всеобщего интереса, вызванного запуском первых спутников и пилотируемых космических кораблей, вместе с лектором планетария Б.А. Максимачевым он организует массовые наблюдения за движением по звездному небу Второго и Третьего искусственных спутников Земли, в беседах и лекциях, публикациях в отечественных и зарубежных изданиях рас-



Встреча с космонавтом В. Комаровым, 1967 г.

сказывает о достижениях в области астрономии и космонавтики.

В 1962 г. на Ленинских горах заканчивается строительство нового Московского городского дворца пионеров и школьников (ныне Московский дворец пионеров на Воробьевых горах) – грандиозного центра детского творчества с небывалыми возможностями того времени. Б.Г. Пшеничнера приглашают в новый детский комплекс для создания в нем первого в нашей стране отдела астрономии и космонавтики.

Вот тут и пригодился опыт работы в школе и в Московском планетарии. Творческий потенциал и энтузиазм первых сотрудников отдела Р.Л. Хотинка, Г.Т. Залюбовиной, Н.В. Козловой и С.П. Яценко позволили Б.Г. Пшеничнеру наметить приоритетные направления деятельности и программу развития отдела на ближайший период и на перспективу. В основу работы

были положены принципы сотрудничества педагогов и учащихся, старших кружковцев с младшими, опережающего образования, предусматривающего непосредственную передачу знаний и навыков исследовательской работы из первых рук от ученых и специалистов. Еще один важный принцип – развитие самостоятельности и ответственности детей и подростков за счет максимально возможного равноправия со взрослыми в деятельности.

По опыту работы Московского планетария создается детский Астросовет, организуются дежурства в обсерватории, массовые астрономические наблюдения в городе и пионерских лагерях, походы и астроэкспедиции. Существенным вкладом в популяризацию космических достижений стало создание клуба юных космонавтов. Благодаря Б.Г. Пшеничнеру, С.П. Яценко и молодежному коллективу старшекласс-



Совет клуба юных космонавтов, 1970-е годы

ников, клуб за год становится первым центром космического образования в нашей стране. В нем появляются авиационные и космические тренажеры, работают опытные преподаватели из числа сотрудников исследовательских предприятий и заслуженных летчиков. Первым почетным председателем клуба становится «космонавт № 3» Андриян Николаев.

В это же время под руководством Бориса Григорьевича создается уникальный ежемесячный городской лекторий «Космические чтения». За все годы его работы московские школьники встретились с учеными многих специальностей, ведущими астрономами, создателями космических проектов и космической техники, космонавтами, летчиками-испытателями, артистами.

Б.Г. Пшеничнер большое внимание уделял развитию материальной базы образовательного процесса. Благодаря взаимодействию авторов проекта и сотрудников Московского планетария во Дворце были построены астрономическая обсерватория и планетарий. Для их оснащения из Московского планетария были получены пятидюймовый телескоп-рефрактор Цейса и простейший проекционный аппарат-планета-

рий. Телескоп прослужил более 50 лет, а в планетарии должен быть установлен современный, четвертый по счету комплекс аппаратуры.

В 1960-е годы появились новые современные направления для учащихся Дворца, были созданы лаборатории астрофизики и физики космоса. И что важно, Борису Григорьевичу удалось прив-

лечь для их создания и дальнейшего развития кружковцев и сотрудников отдела астрономии и космонавтики: С.П. Яценко, В.Г. Попова, И.Н. Маркова, В.А. Ромейко, Н.Ф. Санько. Важным продолжением работы этих лабораторий стали новые экспедиционные астрономические проекты: изучение серебристых облаков (около 50 экспедиций), исследование Тунгусского метеорита (25 экспедиций), экспедиции по наблюдению полных солнечных затмений (9 экспедиций), участие в создании обсерваторий на Памире (Шорбулак и Майданак), высокогорные астрономические экспедиции на Эльбрус и метеоритную экспедицию в Северную Осетию. Впрочем перечислить все выезды просто невозможно.

Важным достижением стало создание загородной наблюдательной базы отдела. Удалось приобрести и собрать на территории Института физики атмосферы РАН дом для наблюдателей, а в астрономической башне Института астрономии РАН был установлен один из крупнейших телескопов Москвы – 60-сантиметровый рефлектор системы Кассегрена (Цейс-600).

Б.Г. Пшеничнер не мыслит организацию образовательного процесса без участия ученых и специалистов, без поддержки руководителей сотрудничающих учреждений. С самого начала

было налажено сотрудничество с Государственным астрономическим институтом им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Астросоветом (позже – Институтом астрономии Академии наук), Московским планетарием. С первого учебного года руководить кружками стали молодые специалисты ГАИШ, ныне широко известные ученые – К.В. Куимова и А.В. Засова. Постоянными консультантами стали Э.В. Кононович, Ю.Н. Ефремов, В.Ф. Есипов, Л.М. Гиндилис и другие. Руководителями кружков в отделе становились наиболее эрудированные студенты астрономического отделения МГУ. Среди них одновременно пришедшие в отдел тогдашние третьекурсники С.А. Ламзин, В.М. Липунов, В.Г. Сурдин и В.И. Чазов – ныне ведущие астрофизики России и замечательные популяризаторы.

Позже было налажено тесное сотрудничество с Научно-исследовательским институтом ядерной физики МГУ, Институтом космических исследований и Институтом физики атмосферы Академии наук, Центром подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, Ракетно-космической корпорацией «Энергия».

Целенаправленно велась работа по профориентации и поддержке способных и мотивированных кружковцев. Многие из выпускников отдела, известные ученые и специалисты, работают в разных областях науки и промышленности, включая астрономию и космонавтику. Некоторые бывшие кружковцы стали педагогами и руководителями в дополнительном астрономическом образовании. Яркий при-



Первая открытая научно-практическая конференция «Эксперимент в космосе» в 2005 г.

мер – воспитанник Бориса Григорьевича Дмитрий Монахов, окончивший астрономическое отделение физического факультета МГУ, затем проработавший педагогом отдела и со временем ставший директором Дворца. Целая плеяда учеников Бориса Григорьевича работает в Институте космических исследований РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Интересна судьба М.П. Татарникова, создавшего сорок лет тому назад в Железнодорожном Астрономическую школу «Вега», которая успешно работает до сих пор под его руководством. Все это время продолжается сотрудничество «Веги» с отделом астрономии и космонавтики Дворца и, до его ухода из жизни, с Б.Г. Пшеничнером.

Кроме основной деятельности во Дворце пионеров (Дворце творчества) Б.Г. Пшеничнер много лет вел большую научно-общественную работу. Более 10 лет был первым заместителем председателя Московского отделения Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО). Около 15 лет он избирался членом Президиума Центрального совета ВАГО, руководил Бюро юношеской секции ВАГО. Благодаря

этому многие годы старшеклассники имели возможность участвовать в работе отделов и секций ВАГО. Особой популярностью пользовались направления научно-любительской работы по исследованию метеоров, серебристых облаков, солнечно-земных связей, изучению переменных звезд, телескопостроению.

При поддержке Министерства просвещения СССР и ЦК Комсомола юношеской секции ВАГО удалось организовать и провести шесть Всесоюзных слетов юных астрономов и космонавтов. Эти сборы юных астроколлективов нашей страны проводились на базе детских лагерей отдыха «Артек» и «Орленок», Шемахинской астрономической обсерватории в Азербайджане, Крымской астрономической обсерватории, Специальной астрофизической обсерватории АН СССР, Бюро юношеской секции ВАГО и общества «Знание»

Сотрудники отдела астрономии и космонавтики Дворца по заданию Министерства просвещения СССР разработали и подготовили к изданию сборники программ кружковых занятий по астрономии и космонавтике для школ и внешкольных учреждений. Сборники дважды выходили в издательстве «Просвещение» под редакцией Б.Г. Пшеничнера. В их подготовке активно участвовали сотрудники научных учреждений: ИКИ, ИМБП, ГАИШ.

Б.Г. Пшеничнер был членом научно-культурного центра SETI (организации по поиску внеземного разума). Он выдвинул идею и стал руководителем проекта «Здравствуй, Галактика!», в рамках которого в конце августа – начале сентября 2001 г. из Национального центра управления и испытания космических средств Украины (бывший Центр дальней космической связи СССР) близ Евпатории с помощью

мощного передатчика, установленного на радиотелескопе РТ-70, были отправлены радиопослания к звездам солнечного типа. Авторы проекта посвятили его наступлению третьего тысячелетия и 40-летию полета Юрия Гагарина. Научным руководителем проекта был доктор физико-математических наук А.Л. Зайцев, главным научным консультантом – руководитель Научно-культурного центра SETI Л.М. Гиндилис. В подготовке и реализации проекта участвовали руководитель клуба «Космос» и выпускник Дворца творчества И.А. Феодулова, астроном Л.Н. Филиппова, консультант отдела астрономии С.П. Яценко.

В 2003 г. Борис Григорьевич впервые в России предлагает школьникам совместно с космонавтами, работающими на МКС, поучаствовать в космическом эксперименте. Идея привлекательна тем, что эксперимент придумывают сами школьники. И вот Б.Г. Пшеничнер стал руководителем Московской открытой научно-образовательной программы «Эксперимент в космосе». 10 проектов, предложенных школьниками – участниками программы, одобрены специалистами для реализации и осуществлены на борту МКС и искусственных спутниках Земли при научном руководстве и поддержке специалистов РКК «Энергия» и ГНЦ ИМБП РАН.

Б.Г. Пшеничнер – автор многих учебных пособий и научно-популярных изданий по астрономии и космонавтике, в том числе книги для учителя «Внеурочная работа по астрономии» (совместно с С.С. Войновым). Его последняя (издана 2011 г.) научно-популярная иллюстрированная книга «Космос: безграничный, загадочный, грозный» стала настольной книгой многих читателей, неравнодушных к современным проблемам космической безопасности, он часто публиковался в журнале «Земля и Вселенная».

Именно благодаря Борису Григорьевичу появилась и успешно развивается сегодня новая педагогика – педагогика дополнительного астрономического и космического образования детей и молодежи. 20 декабря 2012 г. во Дворце творчества состоялась конференция «Космическое образование детей: проблемы и перспективы», научным руководителем конференции стал Б.Г. Пшеничнер. Она была приурочена к 50-летию отдела астрономии и космонавтики. В ней приняли участие педагоги базового и дополнительного образования, преподаватели МГУ и профильных вузов, ученые и космонавты, специалисты ракетно-космической промышленности. В резолюции отмечена важная роль космического образования, вклад в его развитие коллектива отдела астрономии и космонавтики Дворца творчества, сформулированы актуальные задачи и возможные пути их решения.

Борис Григорьевич Пшеничнер был удостоен многих наград и званий, он – действительный член Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, Заслуженный работник культуры РФ, Отличник народного просвещения РСФСР, награжден медалями «За трудовое отличие», «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина», «Ветеран труда», памятными медалями имени К.Э. Циолковского, С.П. Королева, Ю.А. Гагарина, «20 лет Звездного городка» и многими другими знаками отличия, благодарностями, грамотами. Венцом признания заслуг стало вручение в 2015 г. Международной федерацией астронавтики медали им. Фрэнка Дж. Малины, присуждаемой педагогу за выдающиеся достижения в области обучения астронавтике



Б.Г. Пшеничнер, 2008 г.

и космическим исследованиям. А главные награды – его ученики.

В конце хочется привести слова, сказанные на юбилее Бориса Григорьевича доктором педагогических наук, профессором, заслуженным учителем РФ В.П. Головановым:

«Об этом уникальном человеке можно писать много и говорить долго. Он заслуживает этого, хотя сам он очень скромный, деликатный, человек, который всегда больше заботится о других, о деле, которому служил и служит – детству Москвы, детству России. Ведь более полувека Борис Григорьевич Пшеничнер отдает подвижническому труду по развитию астрокосмического образования детей и молодежи в нашей стране».

Фотографии из архива автора

АВАРИЙНЫЙ ПОЛЕТ КОРАБЛЯ «СОЮЗ-1» (расшифровка переговоров В.М. Комарова с Центром управления полетом)

ГЕРАСЮТИН Сергей Александрович,

Мемориальный музей космонавтики

DOI: 10.7868/5004439482004009X

24 апреля 1967 г. при завершении испытательного полета на космическом корабле новой серии «Союз-1» трагически погиб один из лучших космонавтов первого набора Герой Советского Союза Владимир Михайлович Комаров (ЗиВ, 1967, № 3; 2001, № 3, с. 53; 2017, № 3)¹. Его дублер Юрий Гагарин сказал о нем: «Комаров сделал важное дело: испытал новый корабль. Но и другое очень важное дело сделал он: заставил всех нас быть еще собраннее, еще придирчивее к технике, еще внимательнее ко всем этапам проверок и испытаний, еще бдительнее при встрече с неизвестным. Он показал нам, как крута дорога в космос. Его полет и его гибель учат нас мужеству. Мы горды тем, что он был нашим другом, каждый из нас пронесет память о нем через всю свою жизнь»².

Академик Б.Е. Черток, один из заместителей главного конструктора, через многие-многое годы в своих воспоминаниях отмечал: «Такой вариант посадки космонавты не репетировали. Комаров сумел произвести торможение над



В.М. Комаров на тренировках в Центре подготовки космонавтов. Начало 1967 г.

расчетной точкой, но отказала парашютная система. Он сделал все, чтобы вернуться... То, что случилось с Комаровым, – это наша ошибка, разработчиков систем корабля. Мы пустили его слишком рано. Не доработали «Союз» до нужной надежности. В частности, систему приземления, систему отстрела и вытяжки парашюта. Мы обязаны были

¹Лазарев В.Г., Ребров М.Ф. Испытатель космических кораблей. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1979.

²Голованов Я.К. Крутые дороги космоса. Комсомольская правда, 17 мая 1967 г.

сделать, по крайней мере, еще один безотказный, настоящий испытательный пуск, может быть, с макетом человека, и получить полную уверенность, как это сделал Королёв перед пуском Гагарина: два «Востока» слетали с макетом «Иван Иванович». Гибель Комарова на совести конструкторов»³.

«Инженер, летчик, ученый, командир космического корабля, – в нем идеально сочетались воля и интеллигентность. Володя Комаров прекрасно знал, как тяжела и опасна его профессия, но на стартовом столе он был неизменно спокоен. Что крылось за этим мужественным спокойствием?», – вспоминал летчик-космонавт СССР, Герой Советского Союза, член экипажа корабля «Восход» Б.Б. Егоров.

Попробуем на основе записи переговоров В.М. Комарова с Центром управления полетом и документов восстановить ход полета. Понять, когда произошли нештатные ситуации, что предпринималось для предотвращения аварии, как действовал космонавт в сложных условиях отказов систем и почему этот полет состоялся, несмотря на аварии при испытаниях корабля⁴.

Главнокомандующий ВВС по космосу генерал Н.И. Каманин, руководивший отбором и подготовкой первых советских космонавтов, пишет в дневниках: «Годы 1967 и 1968, как и пред-



Главнокомандующий
ВВС по космосу генерал
Н.И. Каманин. 1960-е годы

шествующий им 1966 год, когда не стало С.П. Королёва, вошли в историю отечественной космонавтики как едва ли не самые мрачные». Генерал видел все эти пороки в развитии советской космонавтики: отсутствие квалифицированного государственного руководства, нечеткие планы пилотируемых полетов, ошибки и просчеты главного конструктора В.П. Мишина, распыление сил и средств по многим на-

правлениям между разными ведомствами, бюрократическая волокита при принятии решений, низкая исполнительская дисциплина на всех уровнях.

В 1962 г. в ОКБ-1 было начато проектирование многоместного многоцелевого универсального пилотируемого космического корабля под индексом «7К» (11Ф615), получившего название «Союз». Они создавались мучительно долго и получились недостаточно надежными: три беспилотных испытательных полета кораблей «Союз» (7К-ОК № 2 «Космос-133» 28–30 ноября 1966 г.; 7К-ОК № 1, 14 декабря 1966 г. за несколько секунд до запуска двигателей автоматическая система управления ракеты прервала предстартовые операции, воспламенился теплоноситель в системе терморегулирования корабля, но привел к срабатыванию системы аварийного спасения и взрыву ракеты в стартовом сооружении, повлекший гибель трех человек; 7К-ОК № 3 «Космос-140» 7–9 февраля 1967 г.) оказались полностью либо частично неудачными, было зафиксировано 200 замечаний к конструкции корабля. В эти же годы была создана трехступенчатая ракета-

³ Черток Б.Е. Ракеты и люди. Книга 3-я Горячие дни холодной войны. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1999. С. 182–204.

⁴ Милкус Александр Трагедия «Союза-1»: почему разбился космонавт Владимир Комаров. Комсомольская правда, 24 апреля 2017 г.

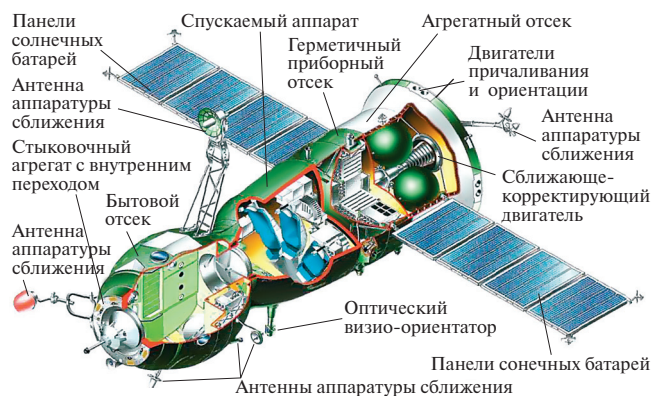


Схема космического корабля «Союз» с внутренним переходом космонавтов, до 1971 г. на «Союзах» его еще не было, переход осуществлялся через открытый космос



Корабль «Союз» (7К-ОК № 2), совершивший полет 28–30 ноября 1966 г. под индексом «Космос-133». Реконструкция

носитель «Союз» (11А57) для запуска кораблей «Союз»⁵.

«Космос-133» и «Космос-140» не приняли команду на закрутку на Солнце и солнечные батареи не смогли пополнить запасы электроэнергии. Кроме того, было обнаружено, что топливо в системе астроориентации со-

кратились за время полета до 50%. Продолжение этих полетов стало невозможным из-за недостатка электроэнергии и рабочего тела. Полет третьего корабля «Космос-140» с манекеном на борту из-за проблем с автоматической системой ориентации (израсходовано слишком много топлива, поэтому корабль не смог выполнить поставленные задачи) стал аварийным. «Космос-140» не долетел до расчетной точки посадки 510 км, УКВ-передатчики при спуске и на земле не работали, а КВ-передатчики работали плохо. Во время посадки дно спускаемого аппарата прогорело из-за нарушений теплозащиты при установке технологической заглушки, и он приземлился вместо запланированного места посадки на лед Аральского моря, вода через прожженное отверстие заполнила его и он затонул (корабль искали 4 часа

вместо 10–15 минут, эвакуация заняла 54 часа).

Необходимо было продолжить летные испытания беспилотного «Союза», но они состоялись лишь в октябре 1967 г. («Космос-186/188») и в апреле 1968 г. («Космос-212/213»), уже после гибели В.М. Комарова. Даже Н.И. Каманина не встревожили нештатные ситуации, было очевидно, что рано еще запускать пилотируемый «Союз»: «Несмотря на серьезные отказы техники, я радовался этому полету. Отказы были только в тех системах

⁵См.: С.П. Королёв и его дело. Свет и тени в истории космонавтики. Составитель Г.С. Ветров. Под редакцией академика Б.В. Раушенбаха. М.: Наука, 1998. С. 603–605, 617–618.

(закрутка, астроориентация, питание рабочим телом), на которых было ручное дублирующее управление, позволяющее космонавту вмешаться в их работу и устранить ошибки автоматики. Все остальные системы и параметры корабля были в норме. Корабль «Союз» показал хорошую маневренность и надежную работу всех двигателей и системы ионной ориентации». По мнению главного конструктора академика В.П. Мишина:



Главный конструктор академик В.П. Мишин. 1960-е годы

на: «Запускать технологические корабли больше не нужно, будем готовить полеты «Союзов» с космонавтами на борту»⁶.

К началу 1967 г. определились кандидаты в состав экипажей «Союзов» (7К-ОК): Гагарин – Елисеев, Николаев – Кубасов, Комаров – Хрунов, Быковский – Горбатко, Береговой – Гречко. Академик В.П. Мишин принял непосредственное участие в их формировании и отборе инженеров из своего ЦКБЭМ (с 6 марта 1966 г. переименовано ОКБ-1, ныне – РКК «Энергия» им. академика С.П. Королёва). 17 января 1967 г. прошло совещание В.П. Мишина с космонавтами, решался вопрос об окончательном составе 1-го и 2-го экипажей: командиры кораблей – Гагарин, Николаев, Комаров, Быковский, Береговой, Шаталов, члены экипажей – Хрунов и Елисеев, Горбатко и Кубасов, Колодин и Волков. Космонавты Гагарин и Макаров высказались, что после третьего и четвертого успешных пусков беспилотного корабля «Союз» нужно переходить к пилотируемым полетам. Но планы трениро-

вок космонавтов при полетах на Ту-104 и в тренажере ТБК-60 были сорваны. В марте 1967 г. Н.И. Каманин усомнился в правильности дальнейших приготовлений: «Я сделал для себя вывод, что порядка и дисциплины в ОКБ-1 нет и что Мишин – неважный руководитель... дела наши космические трещат и разъезжаются по всем швам. Как ни печально, но меня все чаще тревожит мысль: мы неотврат-

имо приближаемся к новым тяжелым происшествиям».

Несмотря на очевидные провалы в реализации лунной программы, была утверждена программа полета «Союз-1» (7К-ОК № 4), которая предусматривала не только первое испытание корабля новой серии в пилотируемом режиме в течение трех суток, но и сразу первую в мире стыковку с кораблем «Союз-2» (7К-ОК № 5) с экипажем из трех человек. Планировался переход через открытый космос двух космонавтов из «Союза-2» для возвращения на «Союзе-1», в нем для них были установлены второе и третье кресла-ложементы⁷. 25 марта 1967 г. Военно-промышленная комиссия Совета министров СССР рассмотрела вопрос о готовности к полету двух кораблей «Союз» с космонавтами на борту, она рекомендовала осуществить пуск в период 20–25 апреля 1967 г., а если пуск в это время не состоится, то перенести его на первую декаду мая. Государственная комиссия 20 апреля 1967 г. подтвердила готовность ракет-носителей «Союз» (11А511 № 3

⁶ Каманин Н.П. Скрытый космос. Т. 2. М.: Издательство «РТСофт», 2013. С. 7, 10–18, 20–68.

⁷ Ребров В.Ф. Космические катастрофы. Странички из секретного досье. М.: ЭСПРИНТ НВ, 1996. С. 37–42.



Первые экипажи кораблей «Союз-1» и «Союз-2» на тренировках: В.Ф. Быковский, А.С. Елисеев, В.М. Комаров и Е.В. Хрунов в скафандрах «Ястреб». Начало 1967 г.

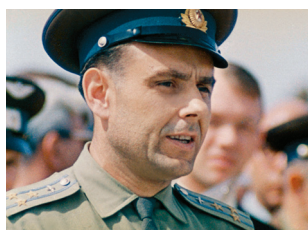
и № 5) и кораблей «Союз-1/2» (11Ф615 № 4 и № 5) к вывозу, утвердила командиром корабля «Союз-1» Владимира Михайловича Комарова, а его дублером – Юрия Алексеевича Гагарина. Для полета на корабле «Союз-2» был назначен экипаж в составе Валерия Фёдоровича Быковского, Алексея Станиславовича Елисеева и Евгения Васильевича Хрунова, их дублерами были Андриян Григорьевич Николаев, Валерий Николаевич Кубасов и Виктор Васильевич Горбатко. 30 марта 1967 г. экипажи успешно сдали экзамены по программе «Стыковка». Командир «Союза-1» предчувствовал беду – перед стартом навел у себя дома порядок, ответил на письма. Он знал, что корабль еще не готов, сказав: «Процентом на девяносто полет будет неудачным».

Подготовка к полету корабля «Союз-1» шла в ускоренном темпе, чтобы успеть запустить корабль к 1 мая. Так как в 1966 г. в СССР не состоялось ни одного пилотируемого полета, то партийное руководство страны требо-

вало от руководителей ракетно-космической отрасли очередных успехов в космосе. Посчитав, что три предыдущих испытательных полета корабля «Союз» допускают его использование в пилотируемом режиме, а подготовка ракет и кораблей идет точно по графику, было принято решение осуществить пуск активного корабля 22 апреля, а пассивного 23 апреля 1967 г. Как отметил 5 января 1967 г. Н.И. Каманин: «...В феврале-марте этого года число космонавтов и слушателей-космонавтов перевалит за 100. С марта 1965 г. мы не летали в космос. За это время США произвели десять пилотируемых полетов. Наше отставание от Америки стало еще большим. ...руководители партии и правительства дали указания, чтобы к 50-летию советской власти космонавты СССР добились заметных успехов. До 1967 г. главным тормозом в осуществлении нашей программы пилотируемых полетов была промышленность (в первую очередь ОКБ-1)...».

Заседание Государственной комиссии 20 апреля 1967 г.: Н.П. Каманин, В.М. Комаров, В.Ф. Быковский, К.П. Феоктистов, А.С. Елисеев. Космодром Байконур. Публикуется впервые

Командир корабля «Союз-1» В.М. Комаров выступает на предстартовом митинге. Космодром Байконур, 22 апреля 1967 г.



В.П. Мишин, В.М. Комаров и Ю.А. Гагарин на стартовой площадке. Публикуется впервые



Старт корабля «Союз-1» с В.М. Комаровым состоялся ночью 23 апреля 1967 г. в 3 часа 35 минут по московскому времени. Последним, кто видел Комарова перед стартом, был Юрий Гагарин, член оперативной группы управления полетом. Он оставался на верхней ферме до самого закрытия люка корабля, а после выведения «Союза» на орбиту вылетел в Евпаторию. Ниже приведем отрывки из радиопереговоров В.М. Комарова (позывной Рубин).

– Самочувствие отличное, перегрузки совсем маленькие, двигатель работает устойчиво.

– Сбросился головной обтекатель на 165 секунде.

– Понял, двигатели все в порядке, полет устойчив.

– 20-й (позывной главного конструктора В.П. Мишина), я Рубин! Открыл иллюминаторы, в иллюминаторе вижу черное, темное небо. Наблюдению созвездий мешает Солнце, которое светит где-то снизу сзади, расстыковка.

– Я Рубин. Понял. 240-я секунда полета... 510-я секунда полета.

– Небольшая тряска, двигатель работает устойчиво.



В.П. Мишин, В.М. Комаров, Ю.А. Гагарин и ракета-носитель незадолго перед стартом КК «Союз-1». Космодром Байконур, 23 апреля 1967 г. Фото РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. Публикуется впервые

– Рубин, я Заря-1 (позывной оператора связи), Вас слышу отлично. Произошло отделение корабля от ракеты, часы пошли. У нас все нормально. По нашим данным отлично. Сообщаю угловые скорости, раскрытие антенны солнечных батарей. Передаю данные по орбите: перигей – 200,9 км, апогей – 224,1 км, наклонение – $51,67^\circ$, период обращения – 88,62 минут.

– Заря-1, я Рубин, сейчас отстегнусь от привязных ремней, посмотрю в иллюминаторы и доложу.

– Понял Вас, отстегивайтесь. Слышу тебя отлично, значит антенны работают.

– Рубин, я Заря-1, как дела у Вас?

– Заря-1, я Рубин, 3 часа 48 минут. Самочувствие отличное, солнечные батареи раскрылись, в правый иллюминатор вижу последнюю ступень, вращается со скоростью примерно 1–2 оборота в секунду.

– Желаю счастливого полета, Рубин, я 10-й (позывной председателя Госкомиссии генерала К.А. Керимова).

– 10-й, я Рубин. В иллюминаторе вижу Землю не покрытую облачностью,

хорошо видны реки, горизонт. В 3 часа 58 минут приступил к проверке оборудования кабины. Солнечная батарея справа видна в правый иллюминатор, в левый иллюминатор солнечную батарею не вижу...

Неприятности случились сразу после выхода корабля на орбиту: не раскрылась левая панель солнечных батарей, что нарушило центровку всего корабля. Удалось получить телеметрию, которая подтвердила нештатную ситуацию: даже если Комарову удастся провести закрутку на Солнце, ток будет только половинным от нормы, питание от аккумуляторов быстро закончится, тогда выйдут из строя системы, нельзя будет включить тормозной двигатель... то есть вернуться домой не получится. Как показало дальнейшее расследование – произошел случайный отказ, панель солнечной батареи зацепилась за маты экранно-вакуумной теплоизоляции. Как ни пытался Комаров ее освободить, ничего не получилось.

Один отказ тянул за собой другие: нераскрывшаяся батарея не дала раз-

вернуться антеннам телеметрической системы; не работала КВ-связь; общаться с Комаровым можно было только в УКВ-диапазоне, что означало резкое уменьшение дальности возможной радиосвязи. Как и в полете «Космоса-140», отказал солнечно-звездный датчик, поэтому ориентировать корабль мог только пилот. Комаров это сделал и оставшуюся батарею сориентировал на Солнце, но при этом асимметрия «Союза» не позволяла провести закрутку! Вручную держать ориентацию на Солнце тоже было нельзя. Это означало очень большой расход топлива из системы ориентации. Можно было надеяться только на запас в аккумуляторных батареях.

– Рубин, я Заря-10, (позывной оператора связи) вызываю на связь. Прием (11 раз повторяется, так как Рубин не слышит)... Проверьте включение телекамеры. Доложите о выполнении закрутки и ток солнечных батарей.

– Заря-1, я Рубин, открылась правая батарея, программа закрутки на Солнце была выполнена.

– Заря-1, я Рубин, считаю необходимым открыть антенны первой группы с пульта, для того, чтобы открыть левую солнечную батарею. При ориентировочном положении на Солнце, оно находится в центре экрана и перемещается в пределах 1° . После ухода корабля в тень, корабль закручивался по тангажу с угловой скоростью $0,75^\circ$ в секунду. На правом КСУ (командно-сигнальное поле – прибор для выдачи космонавтом команд с пульта) горит табло «Закрутка на Солнце», время после начала программы закрутки прошло более 75 минут, сейчас в экране ВСК (визир космический – оптическое устройство для контроля космонавтом орбитальной ориентации и выполнения причаливания) вновь появилось Солнце – движется по рысканью слева, но не вправо.



В.М. Комаров в кабине спускаемого аппарата корабля «Союз» (7К-ОК) на тренировках. Фото РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

– Рубин, я Заря-1, разрешаю вручную произвести закрутку на Солнце.

– Заря-1, я Рубин, тока в солнечных батареях нет...

На втором витке отказал датчик системы ориентации, плохо работал датчик навигации. Позднее не прошла команда на ориентацию корабля на Солнце, из-за запотевания не работал солнечно-звездный датчик, возникли сбои в работе новой ионной системы ориентации.

На третьем витке удалось выполнить закрутку корабля и удерживать правую панель на Солнце, но корабль стал вращаться.

– Заря-1, я Рубин, сообщаю данные на 6 часов 20 минут: давление в ДПО наддува 240, перекисы 16,5, ДО (двигательный отсек) наддув в первой системе – 180, во второй – 300, перекисы в первой – 17, во второй – 3. Параметры кабины: кислород 168, углекислый газ – 0, температура – $+18^\circ\text{C}$, люк-лаз открыт (между спускаемым аппаратом и бытовым отсеком), давление в БО (бытовом отсеке) – 800.

– Понял Вас. Включите ХСА (холодильно-сушильный агрегат – газо-жидкостный теплообменник для охлаждения и осушения атмосферы жилых отсеков) БО, если люк открыт.



В.М. Комаров в корабле «Союз-1» 23 апреля 1967 г. Публикуется впервые

– Заря-1, я Рубин, разрешите передать радиограмму № 1 народам Советского Союза.

– Понял Вас, готов к принятию радиограммы.

– Внимание! Говорит борт космического корабля «Союз-1», народам Советского Союза. В канун славного исторического события 50-летия Великой октябрьской социалистической революции, передаю горячий привет народам нашей Родины, прокладывающим человечеству путь к коммунизму. Летчик-космонавт Комаров.

– Заря, я Рубин, когда батарея попадает на Солнце, ток солнечных батарей равняется 12–14 ампер.

– Корабль вращается примерно со скоростью 0,75° в секунду по тангажу...

При сложившейся тяжелой ситуации оставался вопрос: запускать «Союз-2» или нет? Оперативная группа управления полетом в Евпатории склонялась к тому, что отказы критичны и «Союз-2» должен остаться на Земле. Госкомиссия на космодроме придерживалась другого мнения.

Вспоминает Алексей Елисеев: «Первый вопрос был: хватит ли электроэнергии, чтобы выполнять программу? Считали, проверяли фактическую мощность открытой батареи, строили прогнозы работы системы в случаях, если возникнут другие отказы, и при-

шли к выводу, что можно выполнять намеченный план. Второй вопрос был связан с управляемостью корабля, который приобрел несимметричную форму. И здесь результаты анализа показывали, что нет препятствий для запуска второго корабля (он уже вместе с ракетой находился на стартовой позиции). На эти обсуждения ушло много времени. И почти всё это время руководство совещалось по поводу того, что дальше делать. Мы бродили по коридорам испытательного корпуса в ожидании решения. Часов в девять вечера нас увидел там Василий Мишин. Удивленный, он бросился к нам со словами: «А вы что здесь делаете? Идите немедленно спать! Утром старт!» Мы заспешили в гостиницу и сразу легли. Оставалось несколько часов до подъема... Ведь если бы их запустили... то отказы напрямую не влияли на возможность стыковки, а Елисееву и Хрунову после выхода в космос ничего ни стоило вернуть работоспособность солнечной батарее «Союза-1»⁸. Освободить панель космонавтам не составило бы труда. Развернув солнечную батарею, можно было провести закрутку на Солнце, энергетика восстановилось бы в полном объеме, спешить с посадкой не было бы никакого смысла. Корабли стыкуются, космонавты выходят в открытый космос, успешно исправляют неполадки на терпящем бедствие корабле, после чего вместе возвращаются на Землю...

Экипаж «Союза-2» спас президент Академии наук Мстислав Келдыш: он настоял на том, что пуск необходимо отменить, а Комарова – посадить. Пока Байконур решал что делать, в Евпаторию прилетел Гагарин, который общался с Комаровым на последних витках. Теперь вся группа управления полетом

⁸ Елисеев А.С. Жизнь – капля в море. М.: Издательский Дом «Авиация и космонавтика», 1998. С. 126.

была в сборе. На пятом витке Госкомиссия решила не запускать «Союз-2» и посадить «Союз-1». Комаров выполнил коррекцию орбиты в 9 часов 44 минуты 30 секунд, в результате упало давление в двигателях. Через 6 часов после выхода «Союза-1» на орбиту была дана команда на аварийный спуск:

– Рубин, я Заря-1. Даю данные спуска по виткам: 6-й – в 10 часов 47 минут 36 секунд, 7-й – в 12 часов 04 минуты 32 секунды, 8-й – в 13 часов 40 минут 12 секунд, 9-й в 15 часов 09 минут 46 секунд, 10-й – в 16 часов 41 минута 33 секунды. Как поняли?

– Заря-1, я Рубин, принял.

– Рубин, я Заря, вызываю на связь. Доложите данные о падении давления в ДПО (двигатели причаливания и ориентации) в момент выключения СКД (сближающе-корректирующий двигатель).

– Давление сейчас упало на 20 атмосфер за время ориентации, корабль сориентирован так: по ВСК бег Земли – 145° – 325°.

– Заря, я Рубин, слышу Вас хорошо. Время 11 часов 14 минут.

– Понял Вас, я Заря, коррекция прошла нормально.

– Закрутка на Солнце прошла следующим образом: на двигателях ДПО корабль ориентируется по каналам тангажа и крена. После того, как сориентировал корабль, и Солнце было в центре ВСК, в 10 часов 02 минуты дал ручку управления ориентацией по рысканью (установлена на среднем кресле). Ручку двигал против часовой стрелки. Корабль на отклонение ручки не реагирует. Через 15–20 секунд выключил режимы, отпустил ручку и выключил



*Таким мы запомним
космонавта-испытателя
корабля «Союз»
Владимира Комарова*

программу. В это время Солнце было в центре ВСК, затем плавно начало уходить по рысканью вправо и в 10 часов 05 минут, то есть через 2 минуты оно ушло из ВСК. Два раза пытался произвести закрутку, ничего не вышло. Как поняли?

– Сообщите, поступает ли ток на солнечную батарею.

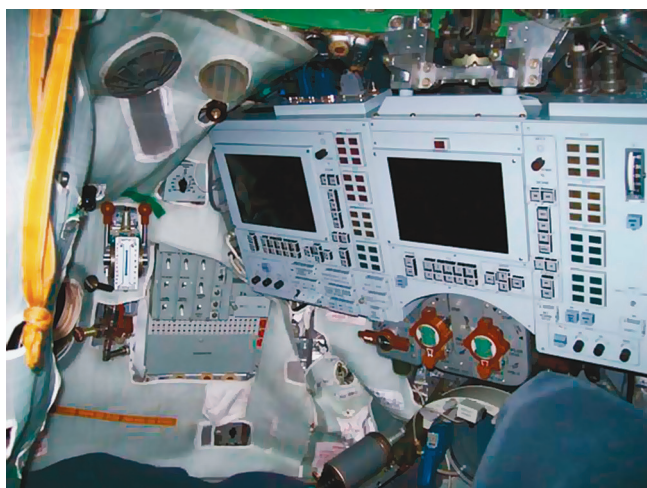
– Заря, я Рубин, ток солнечной батареи показывает ноль. Транспарант «КСУ. Ручная ориентация» не загорался...

– Рубин, сообщите самочувствие. Прошу отдыхать и готовиться к посадке на 18-м витке. Проверьте коррекцию «Глобуса» (навигационный прибор на пульте космонавта). До встречи на Земле!

– Самочувствие нормальное.

– Рубин, я Заря. Сообщаю параметры: долгота 31°, период обращения 88,34 минуты, виток – 6,4-й, время – 12 часов 53 минуты 07 секунд. Как приняли?

Академик Б.Е. Черток пишет в мемуарах: «Все сошлись на том, что имеют место три явно выраженных отказа. Первый – не открылась левая солнечная батарея. Это не только лишает корабль восполнения запасов электроэнергии и ограничивает время существования. При этом открывшаяся половина батареи используется неэффективно. Образовавшаяся механическая асимметрия не позволяет сохранять ориентацию открывшейся половине панели солнечной батареи на Солнце. Механический разбаланс приводит к разрушению режима закрутки. По этой причине неоднократные попытки Комарова провести закрутку вручную привели к повышенному расходу рабочего тела системы ДО.



Панель пульта управления корабля «Союз».
Фото РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

Продолжать дальнейшие попытки закрутки бесполезно и опасно. При включении СКД в режиме торможения для посадки есть опасность потери устойчивости стабилизации в связи с тем, что ДПО не справится с моментом, возникающим из-за смещения центра масс. Второй отказ или случайный сбой – в работе ионной системы. Ее использование с двигателями причаливания и ориентации, по-видимому, несовместимо. Их выхлопы создают помехи ионным трубкам, и мы рискуем растратить топливо и вообще не посадить корабль. Третий отказ – солнечно-звездного датчика 45К – не объясняется козырьком. Что-то более серьезное происходит с самим датчиком»⁹.

Отдых и сон В.М. Комарова в бытовом отсеке «Союза-1» продолжался в течение примерно 7,5 часов (пять витков – с 6,5 до 11-го витка), затем его работа по решению проблем полета возобновилась.

– Рубин, я Заря, на 13-м витке произведите ручную закрутку на Солнце,

используя ДО-1. В случае отсутствия топлива в ДО-1 закрутку выполнять на ДПО, повторно выдав команду «Выключение ручной ориентации». Вместо нее подавать команду «Выключение программ». Проанализируйте и сообщите возможность ручной ориентации на теневой стороне Земли для спуска.

– Заря, я Рубин, уже анализировал такую возможность. Получается, что

по ВСК нельзя сориентировать корабль на теневой стороне, остается возможность сориентировать его по иллюминатору, при этом будет не слишком хорошая точность. Сейчас батареи сели и, как только выйду из тени, приступлю к ручной закрутке.

– Рубин, я Заря-1. Произведите сверку своего местоположения по «Глобусу», затем нам доложите. Прием.

– Заря, я Рубин, сверку «Глобуса» произвел. Виток 11-й, время – 20 часов 14 минут 50 секунд, долгота – 295°.

– Производили ли Вы эксперименты? Какие?

– Я Рубин, Заря. В основном я производил следующие эксперименты: пытался разобраться с системой ориентации, произвел фотографирование земной поверхности и внутреннего отсека спускаемого аппарата...

24 апреля 00 часов 08 минут. 15-й виток.

– Рубин, Рубин, я Заря, как слышите меня? (повторяется 14 раз). На 15-м витке в 00 часов 34 минуты проведите автоматическую ионную ориентацию с ручным управлением по крену. За время ориентации был расход не более 30 атм. Ионную ориентацию провести в 00 часов 35 минут. Выключение на торможение в 1 час 33 минуты

⁹Чертюк Б.Е. Ракеты и люди. Книга 3-я Горячие дни холодной войны. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1999. С. 199, 200.

на освещенной стороне Земли. На теневой стороне оценить возможность ориентации.

– Заря, я Рубин. Ионную ориентацию провести в 00 часов 35 минут. Начинаю предпосадочные операции...

В течение суток полета Комаров все же успел провести испытания основных систем корабля в различных режимах, совершал маневрирование. На 18-м витке происходил спуск корабля «Союз-1» с орбиты. Комаров профессионально, весьма квалифицированно и в полном объеме выполнил весь комплекс работ по оценке поведения «Союза-1» в полете и стал готовиться к возвращению на Землю. Когда поступила команда идти на посадку, автоматика «запретила» выдавать тормозной импульс... Космонавту пришлось ориентировать корабль вручную с помощью оптического визира-ориентатора. Поскольку ионная система ориентации не сработала, спуск мог быть только баллистическим, то есть с большими перегрузками. В спешке в Центре управления нашли выход: Комарову нужно сориентировать корабль еще на солнечной стороне, затем передать управление гироскопам, чтобы ориентация не потерялась, а незадолго до выхода из тени, если это будет возможно, провести корректировку. Космонавт успешно выполнил трудную задачу: тормозной импульс произвел над расчетной точкой над Гвинейским заливом, что зафиксировал дежуривший там корабль слежения «Долинск». Вскоре после этого Комаров вышел на связь с судном наблюдения в Средиземном море. Именно этот сеанс считается последним. Голос у Комарова бодрый, но усталый. Он отпартовал о тормозном импульсе с использованием «лунной ориентации», что занял среднее кресло, пристегнут ремнями и ждет, когда под действием тепловых датчиков произойдет разделение спускаемого и агре-



Ю.А. Гагарин и В.М. Комаров на тренировках в Центре подготовки космонавтов. Конец 1966 г. Публикуется впервые

гатного отсеков. На связи с Владимиром Комаровым в это время был Юрий Гагарин, который очень беспокоился за него (они дружили, даже дни рождения отмечали вместе). Комаров сделал все, даже невозможное, чтобы вернуться с результатами испытаний. Последние слова Комарова: «Я Рубин! Сейчас будет разделение...». Затем голос космонавта утонул в шуме помех... Гагарин пожелал дышать глубже при приземлении, и после ответа Комарова: «Спасибо, передайте всем...» – связь с ним мгновенно оборвалась¹⁰.

Академик Б.Е. Черток: «Время 6 часов 15 минут 14 секунд. Группа анализа успела разобраться и доложила, что гироскоп КИ-38 вышел на восьмиградусный

¹⁰ Давыдов И.В. Триумф и трагедия советской и российской космонавтики. М.: Макцентр, 2007. С. 50–61.

Спуск на основной парашютной системе



Спуск на запасной парашютной системе



Схемы работы основной и запасной парашютных систем корабля «Союз». Во врезке: при спуске «Союза-1» не раскрылся основной парашют. Рисунок и фото РКК «Энергия» им. С.П. Королёва



Траурный митинг на месте гибели В.М. Комарова. Оренбургская область, 25 апреля 1967 г.

контейнера и, по-видимому, приклеилось к парашютному чехлу, поэтому вытяжной парашют не смог вытянуть

основной. На высоте 1,5 км сработал запасной парашют, но не наполнился купол, так как его стропы обмотались



Корабль «Союз МС-12» на орбите. 15 марта 2019 г. Фото РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

вокруг не отстреленного вытяжного парашюта. Спускаемый аппарат ударился о землю со скоростью около 50–80 м/с, что привело к мгновенной гибели космонавта. Произошел взрыв из-за сработавших двигателей мягкой посадки, загорелись емкости с перекисью водорода... В результате аппарат разрушился и практически полностью сгорел, в том числе бортжурнал и бортовой магнитофон. Удар был таким сильным, что образовалось углубление более полуметра. Группа спасателей, прилетевших на вертолетах, немедленно приступила к тушению пожара. Пенные огнетушители не помогли, пришлось забрасывать землей. За время тушения произошло полное разрушение аппарата в виде земляного холмика, под вершиной которого лежала крышка люка «Союза-1».

Ночью 25 апреля останки Владимира Комарова были доставлены в Главный военный клинический госпиталь им. Н.Н. Бурденко и кремированы. В.М. Комарова похоронили в двух мо-

гилах – на месте гибели и урну с прахом в Кремлевской стене. 25 апреля на траурном митинге на Красной площади с трибуны мавзолея выступали Президент АН СССР М.В. Келдыш и Ю.А. Гагарин. 11 июня 1967 г. на месте гибели группой военнослужащих 13 ракетной дивизии РВСН установлен обелиск, позднее – сооружен памятный комплекс.

После аварии «Союза-1» конструкция корабля была полностью переделана – обновлено несколько систем, в том числе парашютная. С 1968 г. по 1981 г. совершили полеты 59 кораблей серии «Союз», в том числе 44 – с экипажем. У этого корабля оказалась длинная жизнь – более 50 лет, он претерпел пять модификаций и создается шестая – грузовой «Союз ГВК». Сейчас «Союз» считается самым надежным и пока единственным средством для доставки экипажей на околоземную орбиту. С июля 2016 г. экипажи долговременных экспедиций на модифицированных кораблях «Союз МС» совершают полеты на Международную космическую станцию.

EARTH & UNIVERSE

4 (334), 2020

July–August

TABLE OF CONTENT:

Lev M. ZELENYI Editorial	3
Anatoly M. Cherepashchuk University Astronomy: Studies of X-Ray Binaries at Caucasus Mountain Observatory and SAI Crimean Observatory	5
Igor D. NOVIKOV New Horizons of General Relativity	22
Vadim A. AREFIEV Following the Very Big Burst	27

IN MEMORIAM

Mihail N. Pavlinskiy (08.12.1959–01.07.2020)	31
--	----

OBSERVATORIES, INSTITUTES

Andrey V. MEDVEDEV, Sergey A. YAZEV Beneath the Rays of the Star Named the Sun. ISTP is 60	32
Viktor M. GRIGORIEV, Alexey A. GOLOVKO The Sun as a Variable Star and Its Magnetic Field	45
Yuri V. YASUKEVICH, Anna S. YASUKEVICH Earth's Ionosphere with GPS and GLONASS	59

PEOPLE OF SCIENCE

Gennady K. BOROVIN, Yuri F. GOLUBEV, Georgy B. EFIMOV, Nikolay N. KOZLOV, Andrey G. TUCHIN To the 96 th Anniversary of Timur Magometovich Eneev	72
Vitaly A. ROMEIKO The Citizen of the Universe. In Memoriam Boris G. Pshenichner	88

HISTORY OF SCIENCE

Sergey A. GERASYUTIN <i>Soyuz-1</i> Crash Flight. Transcript of the talks between Vladimir Komarov and Flight Control Center	94
Table of Content and Selected Abstracts	109

Front page: The Sun and Earth seen from the International Space Station on 24 May 2020. The height of the Sun over the horizon is called the beta angle and its position can influence Space Station operations.
Image credit & Copyright: NASA

EARTH & UNIVERSE

4 (334), 2020

July–August

University Astronomy: Studies of X-Ray Binaries at Caucasus Mountain Observatory and SAI Crimean Observatory

Anatoly M. CHEREPASHCHUK

Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University

DOI: 10.7868/S0044394820040015

Sternberg Astronomical Institute (SAI) is a world-renown center for education and research. In all 188 years of its existence it established a profound base for astronomy observations and student training. In the end of 1980s SAI disposed of three observatories in Crimea, Uzbekistan (Maidanak Mountain), and Kazakhstan (in Tian Shan near Almaty). In 1993-94, two of them were lost, which was a bitter loss for SAI. That is why SAI applied a great effort to build a new high-altitude observatory in Russia.

New Horizons of General Relativity

Igor D. NOVIKOV

Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394820040027

When General Relativity appeared in the beginning of the XX century it brought a number of revolutionary predictions. However, it than took decades to find observational evidences for most of those predictions. In this review I. D. Novikov tells us how General Relativity evolved from a purely theoretical field to stunning experiments and observational discoveries. The reader will be introduced to black holes, dark energy and still exotic and mysterious wormholes.

Following the Very Big Burst

Vadim A. Arefiev

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394820040039

Extremely energetic events are ubiquitous in the sky: among them are supernovae, gamma-ray bursts, galactic collisions and even merging of the cluster of galaxies. However, when asked, which of them is the most powerful, i. e. produces the greatest energy, one is most likely to mention GRBs. The most energetic of GRBs do produce above 10^{54} erg, which is several thousand times more than supernovae provide. But still — are GRBs the most powerful events in the Universe? It turned out that the answer is — no.

Beneath the Rays of the Star Named the Sun. ISTP is 60

Andrey V. Medvedev, Sergey A. Yazev

Institute of Solar Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394820040040

60 years ago in 1960 Siberian Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (SubIZMIR) was founded in Irkutsk within the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. The Institute became the first-rate scientific center in the field of near-Earth space physics in the East of the USSR and built a remarkable set of research instruments. In 1986 it was awarded with the Order of the Red Banner of Labour. In 1993 it was renamed and became the Institute of Solar Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Now it is the base for the future National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences.

The Sun as a Variable Star and Its Magnetic Field

Viktor M. Grigoriev, Alexey A. Golovko

Institute of Solar Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394820040052

Magnetic fields, which underlie the observed solar activity's phenomena, are among the main objects of studies in the Institute of Solar Terrestrial Physics, which turns 60 in 2020. Vladimir Ye. Stepanov, the corresponding member of the RAS, did a lot for these studies. In Irkutsk, full-vector magnetometers were built for six observatories in the USSR, German Democratic Republic, and Czechoslovakia, which reinforced scientific contacts and exchange. In the following years, Solar Telescope for Operative Prediction was developed, and its samples were installed at ISTP Sayan and Baikal Observatories, as well as at Mountain Astronomical Station of the Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences in Kislovodsk and at Solar station in Ussuriysk. It was a great initiative to develop the modern "Solar Service". The paper is dedicated to some of the results of the group.

Earth's Ionosphere with GPS and GLONASS

Yuri V. Yasukevich, Anna S. Yasukevich

Institute of Solar Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.7868/S0044394820040064

Ionosphere is an atmospheric layer, containing a large amount of charged particles, which have a crucial impact upon radiowave propagation. Terrestrial ionosphere is a complex dynamical system, dependent on solar wind, neutral atmosphere, magnetosphere, and the Sun. We examine the opportunities for ionosphere studies, which are provided by such global navigational systems as GPS and GLONASS. These systems gave access to experimental data, which shed a new light upon our ionosphere.

Индекс 70336

Земля и Вселенная, 4/2020

Редакторы С.А. Герасютин, О.В. Закутняя, Д.А. Кононов

Оператор ПК Н.Н. Токарева

Корректоры А.Ю. Обод, С.О. Розанова

Верстка макета Н.В. Мелкова

Просим обращаться

по вопросам публикации материалов:

(495)276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukaran.com

по вопросам сотрудничества:

(495)276-77-35 (доб. 43-01 или 42-91),

e-mail: journals@naukaran.com

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом

Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.

Свидетельство о регистрации № 2119

www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/

Все права защищены.

Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.

*Ответственность за точность и содержание рекламных
материалов несут рекламодатели*

12+

Сдано в набор 18.05.2020 г. Подписано к печати 27.07.2020 г.

Дата выхода в свет 18.08.2020 г. Формат 70 × 100¹/₁₆

Цифровая печать Усл.печ.л. 9.75 Уч.-изд.л. 10.0 Бум.л. 3.75

Тираж 1000 экз. Зак. 19 Цена свободная

Учредители: РАН, ФГУП «Издательство «Наука»

Редакция и издатель: ФГУП «Издательство «Наука»

Адрес: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 90

Отпечатано в типографии ФГУП «Издательство «Наука»

Адрес: 121099 Москва, Шубинский пер., 6

АкадемКнига

Букинистический отдел осуществляет покупку и продажу научной литературы, книг по искусству, антикварных изданий, старинных открыток, гравюр и фотографий

Для оценки крупных библиотек выезжаем на дом

Принимаем заказы

Формируем библиотеки

Адрес: 101000, Москва, Б. Спасоглинишевский пер., 8, стр. 4

E-mail: bukinist@naukaran.com

Справки по телефону:

8 (495) 624-7219





НОВИНКИ И АКЦИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ



[instagram.com/naukapublishers](https://www.instagram.com/naukapublishers)



[facebook.com/naukapublishers](https://www.facebook.com/naukapublishers)



vk.com/naukapublishers



- переплетные работы
- тиснение фольгой
- цифровая печать
- офсетная печать
- ламинирование
- цветоделение
- сканирование
- брошюровка
- лакирование
- цветопроба
- нумерация
- высечка
- верстка
- СТР

Типографии ФГУП "Издательство "Наука"
www.tnauka.ru

- ▶ Разумная ценовая политика
- ▶ Высокое качество продукции
- ▶ Реальные сроки выполнения заказов
- ▶ Работа высококлассных профессионалов



- афиши
- календари
- удостоверения
- адресные папки
- визитные карточки
- фирменные бланки
- брошюры, журналы
- эксклюзивные издания
- полноцветные плакаты
- художественные альбомы
- книги в твердом переплете
- листовки, рекламные буклеты
- наклейки на бумажных материалах

- ♦ Удобное месторасположение
- ♦ Тиражи от 20 экземпляров

Москва

Санкт-Петербург

Новосибирск

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "НАУКА"

"Наука"
Индекс 70336

ПО 50 РУБ.

акция распространяется в сети магазинов "Академкнига"
и в интернет-магазине naukabooks.ru



ЕЩЕ БОЛЬШЕ КНИГ И БОЛЬШЕ СКИДОК

до 80%

акция распространяется в сети магазинов "Академкнига"
и в интернет-магазине naukabooks.ru

условия акций на сайте naukabooks.ru